

Eetu Rönkä

# **RAITIOTIEN PÄÄLLYSRAKENTEEEN SIIRTYMÄRAKENTEIDEN OPTIMOINTI**

Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Joulukuu 2019

# TIIVISTELMÄ

Eetu Rönkä: Raitiotien päällysrakenteen siirtymärakenteiden optimointi  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Joulukuu 2019

---

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää parhaat raitioteiden päällysrakenteen siirtymärakenteiden toteutustavat käyttäen kotimaisia kirjallisuuslähteitä rautateiltä sekä ulkomaisia tutkimuksia raitioteistä. Siirtymärakenteen optimoinnin lähtökohtana oli tarkoitus selvittää, kuinka yksittäiset siirtymärakenteet tulisi suunnitella, jotta ne ovat rakenteellisesti kestäviä ja vähän kunnossapitoa vaativia, mutta myös kannattavia toteuttaa työvaiheen keston ja materiaalikustannusten puolesta.

Tutkimuksen teoriaosuudessa mitoitetaan päällysrakennetyypin vaihdoksesta johtuvien muodonmuutosten teorian avulla siirtymärakenteen eri osia ja selvitetään Suomen olosuhteisiin ja rakennustapoihin sopivaa rakennetta. Kirjallisuuslähteiden avulla vertaillaan jo tutkittuja siirtymärakenteiden ratkaisuja sekä selvitetään sepeliradan tukemismenetelmistä johtuvien reunaehtojen mukaista toteutettavuutta. Tutkimus käsittelee raitiotien kunnossapitoa sekä sen aiheuttamia kustannuksia.

Kirjallisuustutkimuksen sekä teorian havaintojen tukemiseksi suoritettiin onnistuneita kenttämittauksia, joissa mitattiin kahden siirtymärakennetyypin toteutettavuutta mittaamalla eri kuormitusten aiheuttamia pystysuuntaisia muutoksia radan geometriassa. Kiskopyöräkaivinkoneen avulla mitattiin painuman määriä useissa mittauspisteissä sekä raiteissa.

**Avainsanat:** raitiotie, päällysrakenne, siirtymärakenne, sepeliraide, kiintoraide, radan tukeminen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Eetu Rönkä: Optimization of Superstructure Transition Zones on Light Rail Transit  
Bachelor's Thesis  
Tampere University  
Faculty of Built Environment  
December 2019

---

The purpose of this study was to figure out the optimal superstructure transition zone methods of constructing for light rail tracks by assessing domestic literature sources for train tracks and foreign studies of tram tracks. The objective for optimization of the transition zone was to find out how individual transition zones should be designed for them to be structurally durable and only rarely in need of maintenance, but also worthwhile to construct when considering the working hours and material costs needed for the phase.

The theory chapters of this research include designing different parts of the transition zone using the theory behind track transformations caused by the switch in type of superstructure used to be able to find out the type of transition zone structure fitting for Finland's environment and way of building. Literature sources are used to compare already examined solutions for transition zones and to figure out the restrictions of construction and design caused by the methods of ballasted track's tamping. The paper also includes maintenance actions usually caused by transition zones and costs which it usually generates.

To endorse the remarks of literature review and theory, successful field measurements were completed. Field surveys measured the viability to construct various types transition zone structures by measuring vertical transformations in the geometry of a track under various loads. A railway excavator was used to measure the transformation on several rails and points on a single rail.

**Keywords:** light rail track, superstructure, transition zone, ballast track, slab track, tamping of rail

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

# ALKUSANAT

Tämä raitiotien päällysrakenteen siirtymärakenteiden optimointia koskeva tutkimus on tehty Raitiotieallianssin toimeksiannosta osana tekniikan kandidaatintutkintoa.

Tämän raportin on laatinut Eetu Rönkä, ja työtä ovat ohjanneet Heikki Luomala Tampereen yliopistosta ja Timo Kuusela NRC Group Finland Oy:ltä.

Tutkimuksen taustajoukoista erityiskiitokset kuuluvat kenttätutkimusten osalta Kaivinyhdytymä M Paloselle sekä asiantuntijoille Terhi Oldenille ja Jari Huuhkalle NRC Groupista.

Tampereella, 10.12.2019

Eetu Rönkä

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. RAITIOTIEN SIIRTYMÄRAKENTEEN MITOITUS .....	3
2.1    Alusrakenne .....	4
2.2    Sepeliraide .....	7
2.3    Kiintoraide .....	11
3. SIIRTYMÄRAKENNETYYYPIT .....	16
3.1    Kaukalolaatta .....	16
3.2    Ratapölkyt .....	17
3.3    Pohjain .....	18
3.4    Automaattiset ratapölkyt .....	19
4. TUKEMISEN VAIHTOEHDOT .....	20
4.1    Koneellinen tuenta .....	20
4.2    Käsintuenta .....	21
5. KENTTÄMITTAUKSET RAITEEN PAINUMASTA .....	23
6. TULOKSET .....	28
6.1    Pitkäaikaisvaikutukset .....	28
6.2    Kustannukset .....	28
6.3    Rakenteen valinta .....	29
6.4    Virhearviointi .....	30
7. YHTEENVETO .....	31
LÄHTEET .....	33

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

<i>A</i>	rakenteen tai kappaleen pinta-ala
<i>a</i>	ratapölkkyjen jakoväli
<i>b</i>	fiktiivisen ratapölkyn leveys
<i>C</i>	raidealustaluku
<i>c</i>	rakenteelle ominainen kerroin
<i>E</i>	materiaalille ominainen kimmomoduuli
<i>E1</i>	kantavuuden arvo ensimmäisestä mittauksesta
<i>E2</i>	kantavuuden arvo toisesta mittauksesta
<i>Ey</i>	rakenteen päältä saatava kuormituskestävyyskantavuus
<i>Ea</i>	rakenteen alta saatava kuormituskestävyyskantavuus
<i>h</i>	kerroksen tai rakenteen korkeus
<i>h*</i>	kiintoraiteen useat kerrokset huomioiva muunneltu korkeus
<i>I</i>	poikkileikkaukselle tai rakenteelle ominainen neliömomentti
<i>K</i>	radan jäykkyys pystysuunnassa
<i>K1</i>	kiintoraidelaatan lähimpänä sepeliraidetta sijaitseva siirtymärakenteen osa
<i>K2</i>	tavallista kiintoraidelaattaa, mutta myös siirtymärakenteen osa, joka sijaitsee sepeliraidteesta kauimpana
<i>k</i>	palkkiteorian mukainen alustaluku alusrakenteille
<i>L</i>	alueen tai rakenteen pituus
<i>l</i>	kappaleen pituus
<i>m</i>	ratapölkyn pohjan keskellä sijaitsevan kantamattoman alan pituus
<i>n</i>	kappaleiden tai rakenteiden lukumäärä
<i>P</i>	mitoitettava akselipaino
<i>Q</i>	mitoitettava pyöräkuorma
<i>S</i>	ratapölkyn ja -kiskon välinen voima
<i>S1</i>	sepeliraitteen lähimpänä kiintoraidetta sijaitseva siirtymärakenteen osa
<i>S2</i>	avointa tavallista sepeliraidetta, mutta osa siirtymärakennetta
<i>u</i>	ratamoduuli
<i>w</i>	rakenteen tai kappaleen leveys
<i>y</i>	taipuma tietyssä pisteessä
$\beta$	Muutoskerroin radan jäykkyydessä
$\sigma$	Rakenteeseen kohdistuva jännitys

# MÄÄRITELMÄT

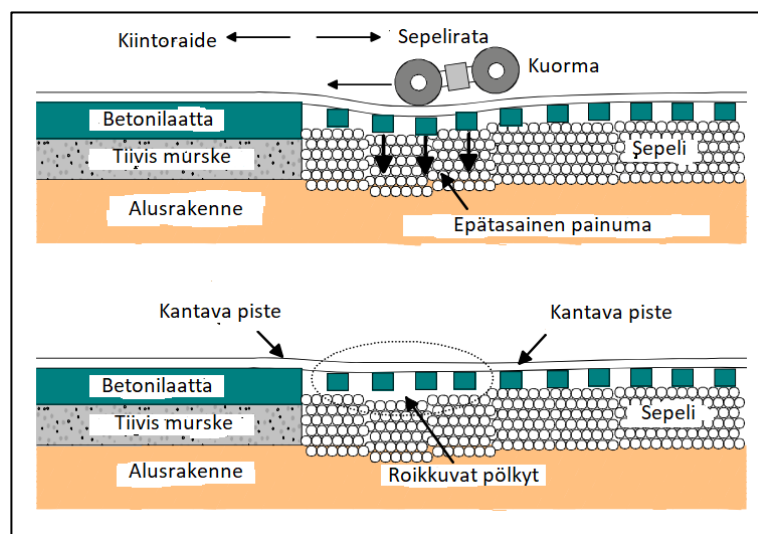
Alusrakenne	Päällysrakenteen alla olevat radan rakenteet. Voi sisältää esimerkiksi eristyskerroksen ja suodatinkerroksen.
Jakoväli	Vierekkäisten ratapölkkyjen jakoväli. Tutkimuksessa voidaan käyttää 600 mm jakovälistä lyhennettä k600.
Kiintoraide	Päällysrakenteen tyyppi, jossa raide tuetaan teräsbetonilaattaan. Kiintoraiteita rakennetaan eri menetelmillä.
Päällysrakenne	Osa rataa, joka sisältää tukikerroksen ja raiteen.
Radan jäykkyys	Radan kokonaisjäykkyys pystysuunnassa. Saadaan ratamoduulin ja kiskon ominaisuuksien arvona.
Raide	Koostuu esimerkiksi ratakiskoista, -pölkkyistä ja kiinnitysosista.
Ratakisko	Päällysrakenteen osa, jota pitkin rataliikenne kulkee. Ratakiskoja on eri malleja. Esimerkiksi Tampereen raitiotiellä käytetään urakiskoa 60R2 ja vignole-kiskoa 49E1.
Ratamoduuli	Kuvaa ratakiskon alapuolisen ratarakenteen pystysuuntaista jäykkyyttä. Kiskon tyyppi ei siis vaikuta ratamoduulin arvoon.
Ratapölkky	Kannattelee kiinnitysosien kanssa kiskoa ja jakaa voimia raidesepeleihin.
Raidesepele	Teknisiltä ominaisuuksiltaan raiteen alle sopivaa tukikerrosmateriaalia.
Sekaliikennekaista	Tarkoittaa kaistaa, jonka raitiotievaunu jakaa muiden moottoroitujen ajoneuvojen kanssa.
Sepeliraide	Päällysrakenteen tyyppi, joka koostuu raidesepeleistä, -pölkkyistä ja -kiskoista
Tukikerros	Pitää raiteen paikallaan ja jakaa kuormia alusrakenteelle. Voi olla esimerkiksi raidesepeleitä tai betonilaatta.

# 1. JOHDANTO

Raitiotien siirtymärakenne on radan päällysrakenteen osa, jonka aikana vaihdetaan valetulta kiintoraidelaatalta sepeliraiteelle. Tutkimus koskee raitiotielle rakennettavien siirtymärakenteiden rakenteellista optimointia. Työn tavoitteena on selvittää keinot ja mahdollisuudet siirtymärakenteiden yksilölliselle suunnittelulle, joka takaa laadukkaamman julkisen liikenteen rakenteen sekä säästöjä kustannuksissa pitkällä aikavälillä.

Raitiotielle tärkeimpiä ominaisuuksia ovat nopea ja helppo matkustaminen, mutta myös matkustuksen mukavuus. Liikkeellä ollessaan matkustaja huomaa parhaiten jyrkät mutkat sekä töyssyt. Töyssyt johtuvat muutoksesta radan pystygeometriassa. Perinteisellä sepeliraiteisella rautatiellä tätä tapahtuu siltojen päädyissä ja raitiotiellä myös vaihdettaessa päällysrakenteelta toiselle. Radan jäykkyys muuttuu tunnetusti näissä paikoissa merkittävästi. Näihin epäjatkuvuus kohtiin täytyy suunnitella ja rakentaa erillinen siirtymärakenne. Raitiotiellä siirtymärakenteita täytyy rakentaa aina vaihdettaessa valetulta kiintoraidelaatalta sepeliraiteelle tai esimerkiksi siltojen kansilla sepeliraiteen alusrakenteen muuttuessa merkittävästi kantavammaksi.

Tavallisella sepeliraiteella pystygeometrian muutokset ja radan asettuminen kuorman alla ovat huomattavasti suurempia kuin kiintoraidelaatalla ja sillalla. Kuorman poistuttua lähimpänä kantavaa rataosuutta olevat ratapölkkyt jäävät vähitellen roikkumaan kiskosta. Raidesepelin ja lähimpien ratapölkkyjen väliin syntyy tyhjää tilaa. Kuva 1 havainnollistaa tapahtuvia muodonmuutoksia [12, s.1].



**Kuva 1.** Siirtymärakenteen muokkaantuminen kuormituksessa. Kuva muokattu lähteestä [12, s.1].



Tyhjä tila kasvaa jokaisen kuorman vaikutuksesta suuremmaksi kasvattaen raiteen joustoa ja aiheuttaen ongelmia liikenteelle. Matkustajat huomaavat joustavuuden töyssynä siirryttäessä sepeliraiteelle tai pois siltä. Ratapölkkyjen liike tyhjässä tilassa aiheuttaa myös raidesepelin murskautumista. Raidesepelin murskautuminen aiheuttaa lisäksi ongelmia joustavuuden ja kuivatuksen kanssa.

Raidesepelin murskautumista ja pystygeometrian muutosta voidaan hallita kunnossapidon ja onnistuneesti toteutetun siirtymärakenteen avulla. Siirtymärakenteiden kunnossapito pitää sisällään alueen raidesepelin vaihtamista ja radan tukemista alkuperäiseen geometriaan. Siirtymärakenteen täytyy tasata eri päällysrakenteiden kokonaisjäykkyyksien eroja ja optimoida raidesepelin kesto alueella. Kunnossapidon, raidesepelin keston ja rakenteen kantavuuden puolesta on tärkeää, että siirtymärakenne voidaan tukea koneellisesti muun radan yhteydessä.

Työ koostuu eri siirtymärakenteen osien teoreettisesta määrittelystä ja suunnittelun perusteista, jonka jälkeen arvioidaan kirjallisuuslähteiden avulla rakenteiltaan ja toteutuksiltaan erilaisia siirtymärakenteen osia. Tukemistavat ja menetelmät asettavat siirtymärakenteen toteutukselle reunaehdoja, joita avataan ennen kenttätutkimuksen esittelyä. Kenttätutkimus ja siinä syntyneet tulokset johdattavat työn tuloksiin ja lopulta yhteenveetoon, jossa tiivistetään tutkimuksen havainnot ja päätelmät.

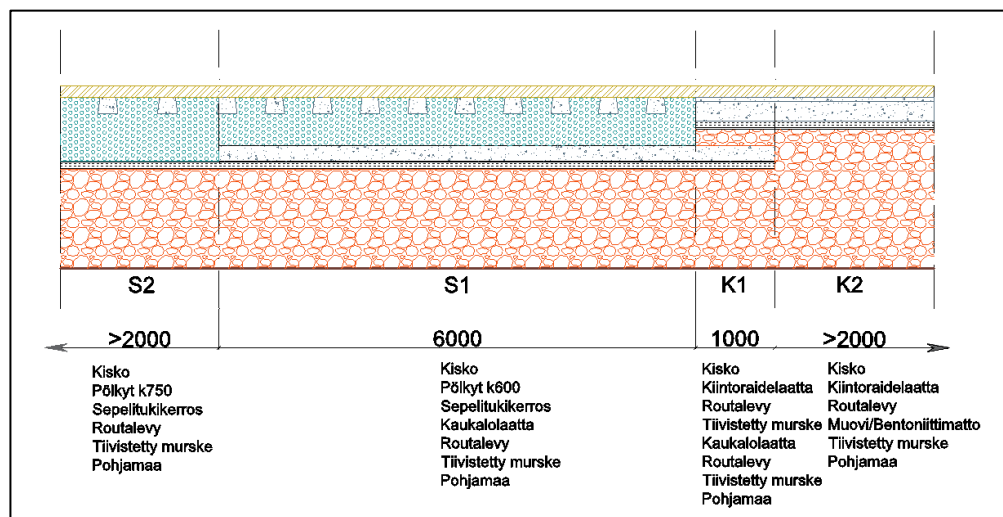
## 2. RAITIOTIEN SIIRTYMÄRAKENTTEEN MITOITUS

Siirtymärakenne jaetaan tässä tutkimuksessa pienempiin kohteena oleviin alueisiin. Siirtymärakennetta lähestytään tässä tutkimuksessa avoimelta ja suoralta sepeliraiteelta, joka muuttuu kiintoraidelaataksi. Siirtymärakenteen pituuden tulisi olla puolessa sekunnissa kuljettu matka suunniteltavan kohteen liikennöintinopeuden mukaan [19, s. 69]. Raitiotiellä tämä tarkoittaisi 40 km/h nopeudella 6 m pitkää siirtymärakennetta. Eri siirtymärakenteen ohjeellisia pituuksia esitetään taulukossa 1.

**Taulukko 1.** Siirtymärakenteen pituus liikennöintinopeuden mukaan.

Liikennöintinopeus (km/h)	Siirtymärakenteen pituus (m)
10	1,39
20	2,78
40	5,56
60	8,33

Optimoinnin takia on kuitenkin tärkeää, että eri kohteiden siirtymärakenteen osat suunnitellaan liikennöintinopeuden mukaisesti yksitellen. Pitkien siirtymärakenteiden käyttö matalien nopeuksien alueilla aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia. Tutkimuksessa käytettäviä siirtymärakenteen yleisiä osia, niiden kerroksia ja etäisyyksiä havainnollistaa kuva 2.



**Kuva 2.** Siirtymärakenteen havainnekuva pituusleikkauksena.

Ensimmäinen osa sepeliraitteen siirtymärakenteesta S2 on viimeinen osuus tavallista avointa sepeliraidetta ennen siirtymärakenteiden tehostettuja osuuksia. Sepeliraitteen puolella, valettuun kiintoraidelaataan päätyvä, siirtymärakenteen osuus nimetään S1. Samaan tyyliin nimetään siirtymärakenteen osat kiintoraidelaatan puolella. Lähimpänä

sepeliraidetta oleva siirtymärakenteen osa kiintoraidelaatalla on *K1* ja sen jälkeen alkaa kauempana sepeliraiteesta sijaitseva siirtymärakenteen osa *K2*, joka rakenteellisesti vastaa tavallista kiintoraidelaattaa. Eri siirtymärakenteen osissa käytetyt komponentit vaihtelevat myös nimetyn alueen sisällä, kun tutkitaan mahdollisia ratkaisuja siirtymärakenteelle. Esimerkiksi sepeliraiteen puolella ratapölkkyjen jakoväli voi vaihdella saman alueen eri ratkaisuissa. Kuvassa 2 nimettyjen tietojen ja rakenteiden mukaisesti esitetään tutkimuksessa kuvaajia, tilastoja, faktoja ja analyysejä.

Kuvan 2 esimerkkinä toimivassa tapauksessa avoimella radalla *S2* ratapölkkyt on jaettu 750 mm välein ja siirtymärakenteeseen *S1* siirtyessä jako on 600 mm. Näistä ja muista ratapölkkyjaoista käytetään tutkimuksessa myös merkintää *k750* ja *k600*. *S1*-alueella jako pysyy samana, mutta alusrakenteeseen tulee mukaan kaukalolaatta. Kiintoraidelaatan puolella *K1* eroaa rakenteellisesti tavallisesta kiintoraidelaatasta alusrakenteiltaan. *K1* rakenteeseen kuuluu 1 m verran raiteen pituussuunnassa jatkuvaa kaukalolaattaa sekä eristekerrosta.

## 2.1 Alusrakenne

Siirtymärakenteissa alusrakenteilta vaaditaan muita radan kohtia suurempi kantavuus. Alusrakenteiden suurempi kantavuus kasvattaa radan jäykkyyttä, mikä on tärkeä tavoite siirtymärakenteen suunnittelussa. Kantavuus ymmärretään usein tarkoittavan rakenteen pysyvien muodonmuutoksien vastustuskykyä, vaikka todellisuudessa kantavuuden luku-arvo tarkoittaa nimenomaan palautuvia muodonmuutoksia [1, s. 28]. Yleisten laatuvaatimusten [11, s. 322] mukaiset alusrakenteiden tavoitteelliset kantavuudet eri päällysrakennetyypeille raitiotiellä ovat esitettynä taulukossa 2, jota käytetään myös levykuormituslaitteella suoritettavissa kenttämittauksissa.

**Taulukko 2.** Alusrakenteelta vaadittu kantavuus. Kuva muokattu lähteestä [11].

Kantavuus (MPa)	Tiiviyssuhde $E2/E1$
< 145	$\leq 2,0$
145...159	$\leq 2,1$
160...174	$\leq 2,2$
175...189	$\leq 2,3$
190...204	$\leq 2,4$
205...219	$\leq 2,5$
220...234	$\leq 2,6$
$\geq 235$	$\leq 2,7$

Vaadittu kantavuus		Maksimikuorma
Kohde	$E2 \geq$	
Katu	170	2,20
Kevyen liikenteen väylä	120	2,00
Kiintoraide	80	2,00
Avorata	120	2,00
Siirtymärakenne	180	2,20

Halutun päällysrakennetyypin perusteella haetaan taulukosta 2 vaadittu kantavuus  $E2$  alusrakenteelle. Numeroinnit kantavuuksien perässä tarkoittavat kenttämittauksissa ensimmäistä ( $E1$ ) ja toista ( $E2$ ) mittausta tietyssä kohtaa valittua rakennetta. Tämä määrittää myös tiiviyssuhteen  $E2/E1$  kyseiselle rakenteelle kenttämittauksia varten.

Kuormitusmitoituksen mukainen kantavuus voidaan määrittää kaavan (1) mukaisesti eli Odemarkin kaavan [23, s. 32] perusteella

$$E_y = \frac{Ea}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \times \left(\frac{h}{0,15}\right)^2}}\right) \times \frac{Ea}{E} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \times \left(\frac{h}{0,15}\right)^2 \times \left(\frac{E}{Ea}\right)^{2/3}}}}. \quad (1)$$

Kaavalla voidaan laskea mitoitettavan kerroksen päältä saatu tavoitekantavuus  $E2$ , jota merkitään mitoituksessa  $E_y$ , tai jokin muista kaavan muuttujista, jotka ovat rakennekerroksen paksuus  $h$ , mitoitettavan kerroksen materiaalin kimmomoduuli  $E$  ja kerroksen alta saatava kantavuus  $Ea$ . Kaavan (1) mukaan voidaan laskea siirtymärakenteen eri osien alusrakenteiden kantavuudet. Kaavan toiminnan mukaan lasketaan jokaisen rakennekerroksen päältä saatava kantavuus, joka on taas seuraavan kerroksen alta saatava kantavuus.

Käytettävien materiaalien kimmomoduulit  $E$  saadaan eri lähteistä. Valmistajan luovuttamasta aineistosta saadaan moduuli eristelevylle [8]. Radan suunnittelussa eristekerroksen kuivatus tulee toteuttaa tarkasti, jotta seisovaa vettä ei kerry vettä läpäisemättömien eristelevyjen päälle [3, s. 3]. Rautateillä on huomattu varsinkin kevättalvella huomattavaa routanousua radoissa, joissa riittävää kuivatusta ei ole suoritettu [13]. Routanousu syntyy usein alusrakenteeseen tai pohjamaahan, josta se vaikuttaa radan geometriaan pitkälle kevääseen. Maakerroksilla kimmokerroin riippuu raekoosta ja syvyydestä. Tiivistetyn murskeen raekokona pidetään 0–63 mm, jonka kantavuusvaatimus on taulukon 1 mukaisesti 180 MPa, mikä voidaan varmistaa levykuormituskokeella [11, s. 322]. Teräsbetonilaatan kimmokerroin saadaan lujuusluokan mukaan taulukkoarvoista. Mitoituksessa käytetään yleisesti paikallavaluissa hyödynnettävää betonia C30/37 [4, s. 3].

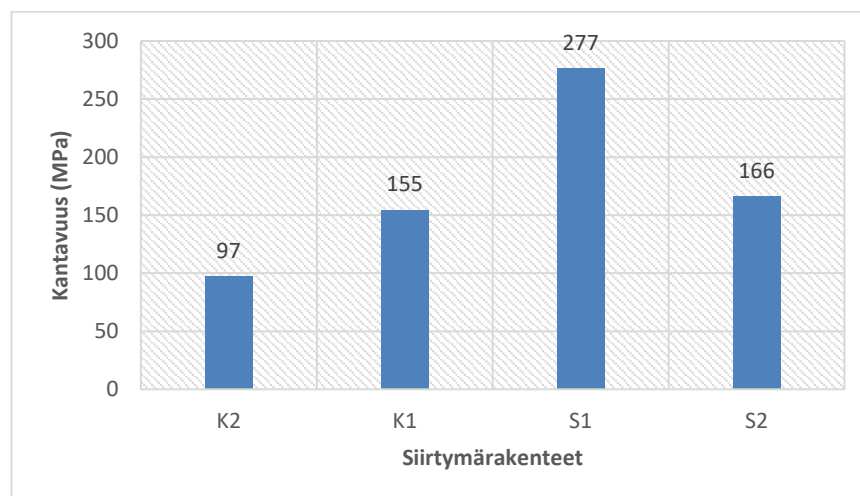
Rakentamisen kannalta jokaisessa siirtymärakenteessa lasketaan kokonaiskerrospaksuudeksi yhtenäisesti 2,20 m. Tämä tarkoittaa korkeuseroa rataiskkon alapinnasta pohjamaan pintaan. Odemarkin kaavassa yleensä kerrospaksuus on normaalisti 150–300 mm ja tätä paksummat kerrokset tulisi laskea osissa. Kuitenkin suuremmilla kerrospaksuuksilla laskettaessa kaava (1) antaa noin 5 % varman puolella olevia arvoja kantavuudelle, mikä on riittävän tarkka tuloksena tässä tarkastelussa. Alla taulukossa 3 on esitetty esimerkkinä rakenteen K1 laskentataulukko Odemarkin kaavan mukaan.

**Taulukko 3.** Esimerkki Odemarkin kaavan laskentataulukosta siirtymärakenne K1:lle.

Siirtymärakenne		K1		
	Kerros- paksuus	Materiaalin E- moduuli	Ea	Ey
Kerros	(m)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Teräsbetoni-laatta	0,25	33 000		
Routalevy XPS	0,10	40	331	<b>155</b>
Sora	0,20	180	785	<b>331</b>
Teräsbetoni-laatta	0,20	33 000	92	<b>785</b>
Routalevy XPS	0,10	40	128	<b>92</b>
Sora	1,35	180	20	<b>128</b>
Yhteensä	2,20			

Ohjeen mukaisesti Odemarkin kaavassa käytettävien materiaalien E-moduulien arvot tulisivat olla korkeintaan  $6 \cdot E_a$  sitomatonta kerrosta mitoittaessa ja  $n \cdot E_a$  sidottua kerrosta mitoittaessa [23, s. 33]. Tässä tapauksessa mennään kaavan käyttömahdollisuuksien rajoilla, mutta tulokset näyttävät kaavan antavan käyttökelpoisia arvoja.

Siirtymärakenteessa on tärkeää, että alusrakenne toimii yhdessä päällysrakenteen kanssa, joten siirtymärakenteen eri osien alusrakenteiden täytyy noudattaa asteittaista jäykkyyden kasvatusta, joka voidaan valitulla esitetyllä alusrakenteella saavuttaa ja todistaa rakenteiden kantavuuksien avulla. Kaikkien rakenteiden kohdalla on tehty taulukon 3 mukainen laskentataulukko. Myös sepeliraiteen osuuksille on laskettu kantavuuden arvot, vaikka Odemarkin menetelmä ei ole mitoituksessa käytettävä kaava. Sepeliraiteen puolen rakenteet ovat mukana suuntaa antamassa ja hahmottamassa tilannetta. Kuva 3 esittää alusrakenteen päältä saatuja kantavuuksia siirtymärakenteen eri osissa.



**Kuva 3.** Siirtymärakenteen kantavuus alusrakenteesta.

Diagrammit kuvassa 3 näyttävät, että kuvan 3 mukainen alusrakenteiden tasainen vahvistus siirtymärakenteessa kasvattaa kantavuutta halutulla tavalla. Tämä on tärkeää yhteisen toiminnan kannalta päällysrakenteen kanssa. Molemmilla päällysrakenteen osille suoritetaan omat mitoitusraportit vielä erikseen. Kuvassa 3 esitetyt kuormituskestävyyden arvoja alusrakenteen päältä käytetään myöhemmin raportissa.

## 2.2 Sepeliraide

Siirtymärakenteen ja sepeliraiteen mitoituksessa yksi tärkeimmistä tekijöistä on radan pystysuuntainen kokonaisjäykkyys  $K$ . Sepeliraiteen osuus mitoitetaan tässä tutkimuksessa radan kokonaisjäykkyyden teorian mukaisesti. Samaa teoriaa on käytetty Liikenneviraston selvityksessä, jonka mukaisesti teoria tässä esitetään ennen raitiotielle yksilöityjä mitoituksia [10]. Radan kokonaisjäykkyys koostuu eri rakennekerrosten jäykkyyksistä [10, s. 12]. Lähellä tätä termiä on ratamoduuli  $u$ , joka sisältää koko radan jäykkyyden, mutta jättää huomiotta itse kiskon ja sen taivutusjäykkyyden  $EI$ . Ratamoduulin arvon tunnetaan vaihtelevan suuresti, jopa samalla radalla täysin olosuhteitten mukaan. Ratamoduulin arvo samalla radalla voi talvella jäätyneenä olla jopa 1,5 kertaa suurempi verrattuna kosteaan kesäpäivään [6, s. 19].

Sepeliraide mitoitetaan kuivan raidesepelin normaaliolosuhteita mukaillen. Radan jäykkyys  $K$  voidaan määritellä

$$K = \frac{Q}{y}, \quad (2)$$

jossa  $Q$  on pisteessä vaikuttava pyöräkuorma ja  $y$  on kiskon taipuma kuorman alla. Taipuma  $y$  rataiskossa kuorman vaikutuksesta voidaan määritellä myös

$$y = \frac{Q \times \beta}{2 \times u}, \quad (3)$$

jossa  $Q$  on kuin edellä,  $u$  tarkoittaa ratamoduulia ja  $\beta$  määritellään

$$\beta = \left( \frac{u}{4 \times EI} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (4)$$

jossa  $u$  on edellä mainittu ratamoduuli ja  $EI$  tarkoittaa kiskotyypille ominaista taivutusjäykkyyttä, jossa  $E$  on käytetyn teräksen kimmomoduuli ja  $I$  on käytetyn kiskoprofiilin jäyhyysmomentti.

Yhdistämällä kaavat (2), (3) ja (4) saadaan yhteys ratamoduulin ja jäykkyyden välille

$$K = \sqrt[4]{64 \times EI \times u^3}. \quad (5)$$

Aiemmin mainittu muodonmuutoskerroin  $\beta$  voidaan määrittellä Timoshenkon ja Langerin mukaan [2, s. 277] myös toisessa yhteydessä. Ratapölkyn ja kiskon välinen voima  $S$  voidaan määrittellä

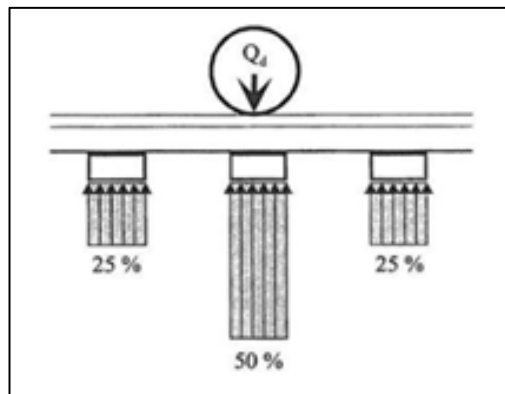
$$S = \beta \times a \times P, \quad (6)$$

jossa  $a$  tarkoittaa ratapölkkyjen jakoväliä ja  $P$  kuormittavaa akselipainoa. Kun saadaan laskettua voima  $S$  tietyssä kohdassa, voidaan kaavasta (6) ratkaista  $\beta$ , jonka jälkeen se voidaan sijoittaa kaavaan (4) ja ratkaista ratamoduuli  $u$

$$u = \left( \frac{S}{a \times P} \right)^4 \times 4 \times EI, \quad (7)$$

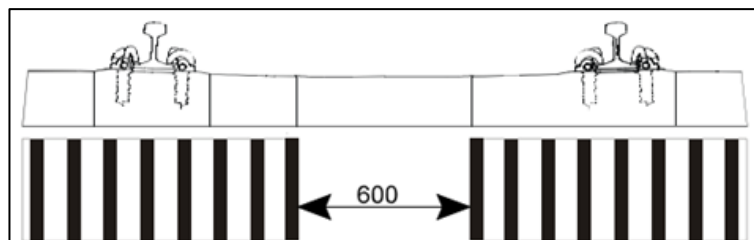
jossa merkit ovat kuten edellä mainittu. Tämä kaava antaa viimein yhteyden kokonaisjäykkyyteen  $K$ , jonka kaavaan (5) tämä ratamoduulin  $u$  arvo voidaan sijoittaa.

Ratapölkyn kohdalla kiskon ja ratapölkyn välissä vaikuttavan voiman  $S$  laskemiseksi täytyy määrittää, kuinka mitoittava akselipaino jakaantuu halutuilla ratapölkkyillä, valitulla ratapölkkyvälillä raidesepeliin. Pyöräkuorman on esitetty jakautuvan likimääräisesti kolmelle vierekkäiselle ratapölkylle alla olevan kuvan 4 mukaisesti [9].



**Kuva 4.** Raymondin mallin mukainen pyöräkuorman jakautuminen ratapölkkyillä [9].

Poikkileikkauksen suunnassa ratapölkylle tuleva kuormitus jakautuu ratapölkyn päihin jättäen keskelle kuormittamattoman alueen  $m$  pituudeltaan 600 mm [21, s. 20]. Alla oleva kuva 5 havainnollistaa tilannetta.



**Kuva 5.** Kuormituksen jakautuma ratapölkkyllä [21, s. 20].

Ratapölkkyt mallinnetaan yleisesti jatkuvina rakenteina. Liikenneviraston tutkimuksen mukaisesti tietyn ratapölkkyvälin ratapölkky voidaan muuttaa mitoituksessa jatkuvaksi rakenteeksi määrittämällä niiden fiktiivisen leveyden  $b$  [10, s. 58]. Fiktiivisen leveyden määrittämisessä ratapölkyn pohjan kuormia kantavan tehokkaan pinta-alan puolikas jaetaan käytetyllä ratapölkkyvälillä.

$$b = \frac{w \times (l - m)}{2 \times a}, \quad (8)$$

jossa  $w$  on ratapölkyn kantavan alueen alapinnan leveys,  $l$  on ratapölkyn pituus,  $m$  aiemmin mainittu pituus kantamattomalle alueelle ja  $a$  ratapölkkyjen jakoväli.

Aiemmin havainnollistetun Raymondin menetelmän mukaisesti pyöräkuorma jakautuu kolmen ratapölkyn avulla raidesepeleille [21]. Pituussuunnassa tästä saadaan ratapölkkyvälistä riippuva mitta  $L$

$$L = (n - 1) \times a + w, \quad (9)$$

jossa  $n$  on kuorman kantavien ratapölkkyjen määrä eli tarkastellussa tapauksessa 3 ja  $a$  sekä  $w$  ovat kuten edellä. Kaavan (8) fiktiivinen leveys  $b$  kerrottuna kantavan alueen pituudella  $L$  saadaan kaava pyöräkuorman vastaanottavalle alalle  $A$

$$A = L \times b, \quad (10)$$

jonka suuruiselle alueelle voidaan mitoittavan akselipainon puolikas eli pyöräkuorma jakaa. Voidaan määrittää raidesepeleille kohdistuva kuorma. Rautateillä raidesepeleihin vaikuttavalle jännitykselle  $\sigma$  on määritetty maksimiarvoksi 0,45 MPa [15, s. 4-58]. Mitoitetaan rakenteet, jotta tämä arvo ei ainakaan ylitä. Kuormalle saadaan kaava

$$\sigma = \frac{Q}{A}, \quad (11)$$

jossa  $Q$  on edellä mainittu pyöräkuorma eli puolet mitoittavasta akselipainosta ja  $A$  on pyöräkuorman vastaanottava ala.

Kaavassa (5) tarvitsimme radan kokonaisjäykkyyttä  $K$  varten ensin ratamoduulin  $u$ , josta ainoa tuntematon oli ratapölkyn ja rataiskkon välinen voima  $S$ . Tämä voima voidaan määrittää myös kaavalla

$$S = \sigma \times b \times a, \quad (12)$$

jossa suureet ovat kuin aiemmin mainittu. Näin saadaan toinen kaava ratamoduulille  $u$

$$u = \left( \frac{\sigma \times b}{P} \right)^4 \times 4 \times EI, \quad (13)$$

jonka arvo voidaan sijoittaa kaavaan (5), jotta saadaan kokonaisjäykkyys  $K$ .



Raitioteillä yleisesti käytettävien betonisten ratapölkkyjen mitat, kiskoprofiilin parametrit ja mitoittava kuorma ovat esimerkkinä toimivassa taulukossa 4. Käytetään raitiotiellä yleistä vignole-kiskoa 49E1 sekä ratapölkkyjakoa k750 ja 2200 mm pitkää ratapölkkyä.

**Taulukko 4.** *Esimerkki lähtötiedoista mitoitukseen.*

<b>49E1</b>	<b>Suure</b>	<b>k750</b>
Ratapölkyn leveys (mm)	<b>w</b>	250
Ratapölkyn pituus (mm)	<b>l</b>	2 200
Ratapölkyn korkeus (mm)	<b>h</b>	200
Mitoittava akselipaino (N)	<b>P</b>	140 000
Pyöräkuorma (N)	<b>Q</b>	70 000
Pölkkyväli (mm)	<b>a</b>	750
Kiskon kimmomoduuli (N/mm <sup>2</sup> )	<b>E</b>	206 800
Kiskon neliömomentti (mm <sup>4</sup> )	<b>I</b>	18 160 000

Lähtötiedoilla saadaan laskettua arvot ratamoduulille  $u$  kaavalla (7), kokonaisjäykkyydelle  $K$  kaavoilla 2 ja 5 sekä taipuman maksimille  $y$  kaavalla (3). Tunnetuilla arvoilla voidaan myös esittää raidealustaluku  $C$

$$C = \frac{u}{b}, \quad (14)$$

jossa  $u$  ja  $b$  ovat kuten edellä on määritelty. Määriteltyämme raidealustaluvun  $C$ , voidaan määrittää myös taipuman maksimi  $y$  käyttämällä jännitystä  $\sigma$  raidesepelin ja ratapölkyn välillä

$$y = \frac{\sigma}{C}, \quad (15)$$

Näistä mitoituksessa käytettävistä arvoista on koottu esimerkkinä taulukko 5 alapuolelle. Taulukon arvoja laskiessa on käytetty lähtöarvoja taulukosta 4.

**Taulukko 5.** *Esimerkkiarvot sepeliraitteella kokonaisjäykkyydelle ja taipumalle.*

<b>49E1</b>	<b>Suure</b>	<b>k750</b>	<b>Kaava</b>
Ratamoduuli (N/mm/mm)	<b>u</b>	25,627	7
Radan jäykkyys pystysuunnassa (kN/mm)	<b>K</b>	44,85	5
Radan jäykkyys pystysuunnassa (kN/mm)	<b>K</b>	44,85	2
Raidealustaluku (N/mm <sup>3</sup> )	<b>C</b>	0,096	14
Taipuman maksimi (mm)	<b>y</b>	1,561	3
Taipuman maksimi (mm)	<b>y</b>	1,561	16

Taulukosta 5 nähdään, että suorilla osuuksilla raitiotiellä käytettävän harvimman ratapölkkyvälin ratamoduuli on joustavaa laatua mutta realistinen. Myöskin palautuvan taipuman arvo on realistinen. Esimerkin ratapölkkyväliä ja sen keskellä itse kiskohan ei taipuisi edes millimetrin kymmenystä, jos ratapölkkyt olisivat kiinteitä tukia. Suoritetaan

samat laskutoimitukset muilla ratapölkkyväleillä sepeliraiteelle ja esitetään tulokset kiintoraidelaatan mitoituksen jälkeen.

## 2.3 Kiintoraide

Kiintoraidetta rakennetaan yleensä kahdella eri menetelmällä. Suoran kiinnityksen menetelmän mukaisilla radoilla kiskot kiinnitetään kaksiosaisiin, terästangoilla yhdistettyihin ratapölkkyihin, jotka valetaan eristekerroksen päälle pintalaattaan kiinni. Kiskot eristetään vielä elastisilla elementeillä. Lopuksi raiteiden väliset ja ympäröivät alueet voidaan päällystää esimerkiksi ruohikolla tai asfaltilla. Kyseinen järjestelmä kestää taivutuslujuutta heikosti, joten se täytyy rakentaa hyvin vähän painuvalle perustalle. Rakenne on hyvin jäykkä ja vaihdettaessa sepeliraiteelle suoraan tältä kiintoraidelaatalta, vaaditaan siirtymärakenteelta tarkkaa suunnittelua. Kuva 6 havainnollistaa Tampereen raitiotiellä käytettävää suoran kiinnityksen menetelmää.



**Kuva 6.** Suoran kiinnityksen kiintoraidelaatta ennen pintalaatan valua.

Kiintoraidelaattaa täytyy käyttää myös sekaliikennekaistoilla. Tällöin ratakiskot täytyy suojata teräsbetonisilla kauluksilla, joiden väliseen kouruun juotosvaletaan elastisella kumilla eristetyt ratakiskot. Tällaista upotettua kiskojärjestelmää suositetaan aina, kun raitteen päällä tai yli kulkee kumipyöräliikennettä tai kohteeseen aiheutuu suuria käyttörasituksia. Elastiseen kumiin upotettu rata on suoraan kiinnitettyä rataa joustavampi rakenne, mikä soveltuu siirtymärakenteiden alkuihinkin paremmin. Käytännöllisyydenkin puolesta upotettuja kiskoja käytetään usein ennen sepeliraiteen siirtymistä, koska siirtymärakenteet sijaitsevat yleensä risteyksissä sekä vastaavissa ylikulkua vaativissa kohdissa, joissa teräsbetonisia kauluksilla vahvistettuja kiskoja tarvitaankin. Kuva 7 esittää elastisesti ympäröityä, kouruun upotettua ratakiskoa, jonka yli kulkee kumipyöräliikenteen tie. Kulkureitti vaatii upotetun kiskojärjestelmän mukaisen upotetun kiskojärjestelmän kiintoraidelaatan sekä siirtymärakenteen vaihdettaessa sepeliraiteen puolelle.



**Kuva 7.** Upotettu kiskojärjestelmä siirtymärakenteen päässä.

Kiintoraide mitoitetaan tässä tutkimuksessa upotetun radan mukaisesti, koska se on yleisempi sekä suositeltavampi kiintoraiteen tyyppi ennen siirtymärakennetta. Mitoitus suoritetaan palkkiteorian perusteella, jolla on pohjoismaissa mitoitettu raitiotie- sekä suurnopeusratoja [7, s. 17]. Palkkiteoria antaa kaksiulotteista laattateoriaa suurempia arvoja rasituksille ja muodonmuutoksille, kun alusrakenteen kantavuus on heikko. Molemmat periaatteet alkavat antaa vastaavia arvoja, kun alusrakenteen kantavuus ylittää 10 MPa, joten tämän tutkimuksen kannalta molemmat antaisivat luotettavia tuloksia [7, s. 45].

Kiintoraidelaatta voidaan mitoittaa elastiselle perustukselle, joka riippuu alusrakenteesta. Jäykempi alusrakenne lyhentää raiteen elastista mitta ja joustavampi pidentää sitä. Pitkä elastinen mitta tarkoittaa, että kuormat jakaantuvat raiteen pituussuunnassa pidemmälle matkalle. Tietyllä kuormalla ja tietyssä pisteessä vain elastisen pituuden alueella oleva kiintoraidelaatan osa kokee kuorman vaikutuksen. Elastisen pituuden laskentaa varten tarvitsemme alusrakenteelle ominaisen alustaluvun  $k$ , joka voidaan määrittää kaavalla (16)

$$k = \frac{E_3}{h^*}, \quad (16)$$

jossa  $E_3$  on alusrakenteen kantavuus ja  $h^*$  on vastaava korkeus kiintoraidelaatalle, joka ottaa huomioon eri kerrokset sekä niiden kantavuudet rakenteessa. Tämä vertailukorkeus voidaan määrittää kaavan (17) avulla

$$h^* = c_1 \times h_1 \times \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_3}} + c_2 \times h_2 \times \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}}, \quad (17)$$

jossa  $c_1$  ja  $c_2$  ovat kerrokselle ominaisia kertoimia. Betonisille ja sidotuille kerroksille tämä kerroin on 0,83 ja sitomattomille kerroksille 0,9.  $E_3$  on aiemmin mitoitettu alusrakenteen kantavuus, joka riippuu alusrakennetyypistä. Kimmomoduulit  $E_1$  ja  $E_2$  sekä rakenteen korkeudet  $h_1$  ja  $h_2$  ovat teräsbetoni- ja pohjakerroksen ominaisia arvoja. Pohjaker-

roksena pidetään tämän tutkimuksen mitoituksessa raiteen eristävää elastista materiaalia olevaa kumia. Yhdessä nämä kolme kerrostyyppiä muodostavat mitoitettavan kiintoraiteen rakenteen.

Palkkiteorian mitoitusta varten tarvitsemme myös teräsbetoni-laatan muunnellun korkeuden  $h_{11}$ , joka ottaa huomioon eri kerrokset valitussa päällysrakenteessa

$$h_{11} = \sqrt[3]{\frac{E_1 \times h_1^3 + E_2 \times h_2^3}{E_1}}, \quad (18)$$

jossa käytetyt merkinnät ovat kuten edellä on jo mainittu. Tämän avulla voidaan määrittellä palkkiteorian mukaisen palkin neliömomentin  $I_P$  kaavalla (19)

$$I_P = \frac{w_l/2 \times h_{11}^3}{12}, \quad (19)$$

jossa  $w_l$  on teräsbetoni-laatan leveys ja  $h_{11}$  on kuten kaavassa (18) määriteltiin. Nyt voidaan esittää elastisen pituuden  $L_{el}$  määritelmä kaavalla (20)

$$L_{el} = \sqrt[4]{\frac{4 \times E_1 \times I_P}{w_l/2 \times k}}, \quad (20)$$

johon voidaan yhdistää kaavasta (16) alustaluvun  $k$  määritelmä ja kaavasta (19) määritelmä palkin neliömomentille. Kaavan muut merkinnät ovat kuten edellä on mainittu. Elastisen pituuden määritelmän myötä voidaan laskea suurin mahdollinen painuma  $y$  mitoitettavan kuormituksen  $Q$  alla kaavan (21) mukaisesti

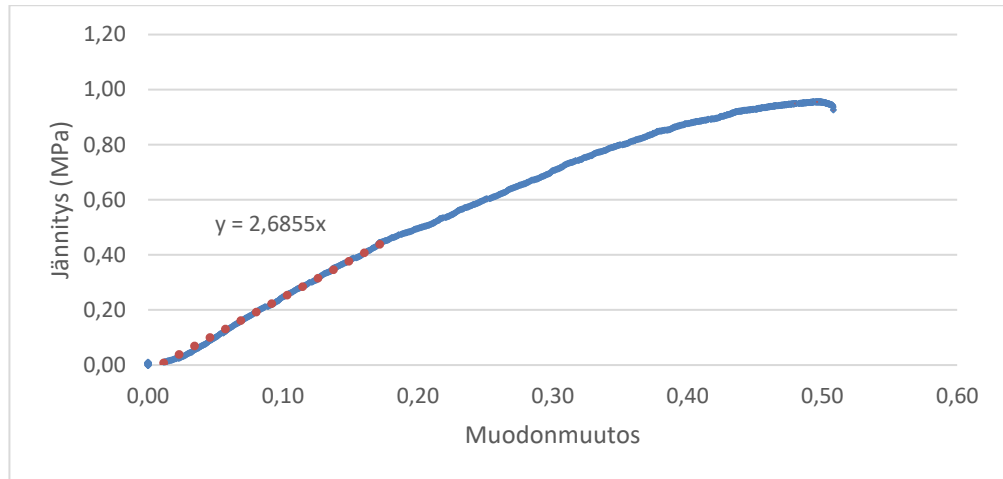
$$y = \frac{Q \times L_{el}^3}{48 \times E_1 \times I_P}, \quad (21)$$

jossa  $Q$  on mitoitettava pyöräkuorma ja muut merkinnät ovat kuten aiemmin on määritelty. Tästä voidaan myös laskea radan pystysuuntaisen kokonaisjäykkyyden  $K$  arvo kaavan (2) mukaisesti. Kiintoraidelaatan mitoituksessa voidaan käyttää lähtötietoina alla olevan taulukon 6 arvoja.

**Taulukko 6.** *Lähtötietoja mitoitukselle.*

Kiintoraidelaatta	Merkintä	49E1
Akselipaino (N)	P	140 000
Pyöräkuorma (N)	Q	70 000
Kiskon kimmomoduuli (N/mm <sup>2</sup> )	E.k	206 800
Kiskon neliömomentti (mm <sup>4</sup> )	I.k	18 160 000
TB-laatan leveys (mm)	w.l	2 350
TB-laatan korkeus (mm)	h.1	250
TB-laatan kimmomoduuli (N/mm <sup>2</sup> )	E.1	33 000
Sidotun kerroksen kerroin	c.1	0,83
Elastisen materiaalin korkeus (mm)	h.2	30
Elastisen materiaalin kimmomoduuli (N/mm <sup>2</sup> )	E.2	2,69

Taulukossa 6 esitetty elastisen materiaalin kimmomoduulille saadaan arvo valmistajan lähettämien jännitysten ja muodonmuutosten mittaustulosten avulla [18]. Materiaalin käyttäytyminen ei ole täysin lineaarista, mutta kimmomoduulia varten materiaalin käyttäytyminen käyttörajatilassa voidaan määrittää kuormitusmittausten alkupään käyrästä lineaarisella suoralla. Mittaustulosten kuvaaja on esitetty alla kuvassa 8.



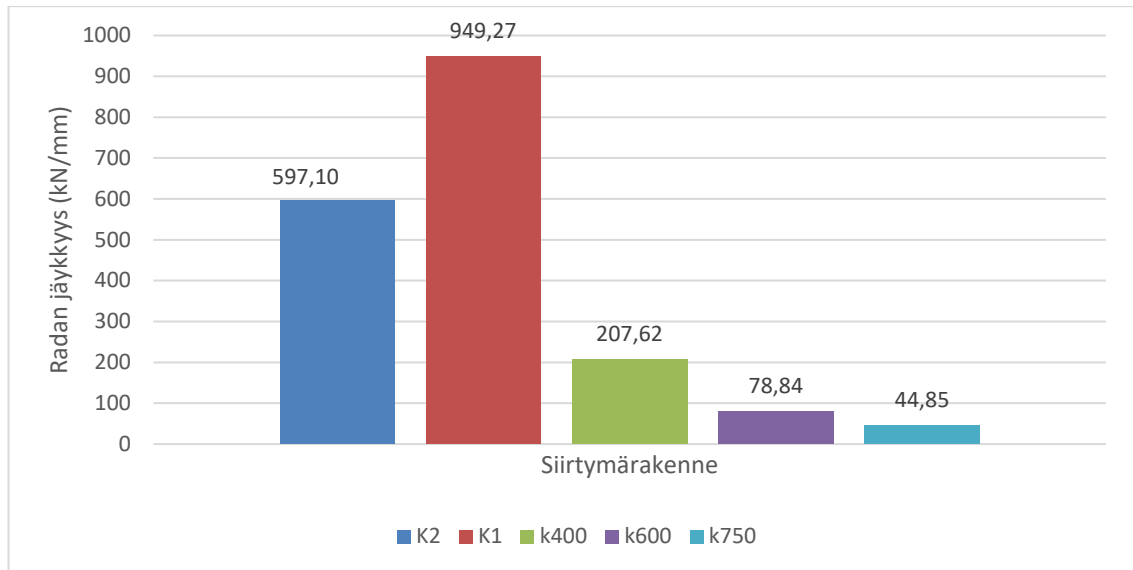
**Kuva 8.** Elastisen materiaalin kimmokerroin mittaustuloksista.

Alkuarvoilla voidaan laskea edellä määritettyjä kaavoja käyttäen arvot eri siirtymärakenteen tyypeille kiintoraidelaatalla. Alla olevassa taulukossa 7 on lähtöarvojen mukaan määritettyjä suureita esitettyjen kaavojen mukaan laskettuna.

**Taulukko 7.** Laskentapohja kiintoraidelaatan mitoitukselle K2 rakenteessa.

Kiintoraidelaatta	Merkintä	K2	Kaava
Alustaluku (N/mm)	<b>k</b>	0,06681	16
Kiintoraidekorkeus (mm)	<b>h*</b>	1 456,8	17
Päällysrakennekorkeus (mm)	<b>h.11</b>	250,0	18
Palkkiteorian neliömomentti (mm <sup>4</sup> )	<b>I.P</b>	1,53E+09	19
Elastinen pituus (mm)	<b>L.el</b>	1 266,5	20
Taipuman maksimi (mm)	<b>y</b>	0,1173	21
Radan jäykkyys pystysuunnassa (kN/mm)	<b>K</b>	596,5	2

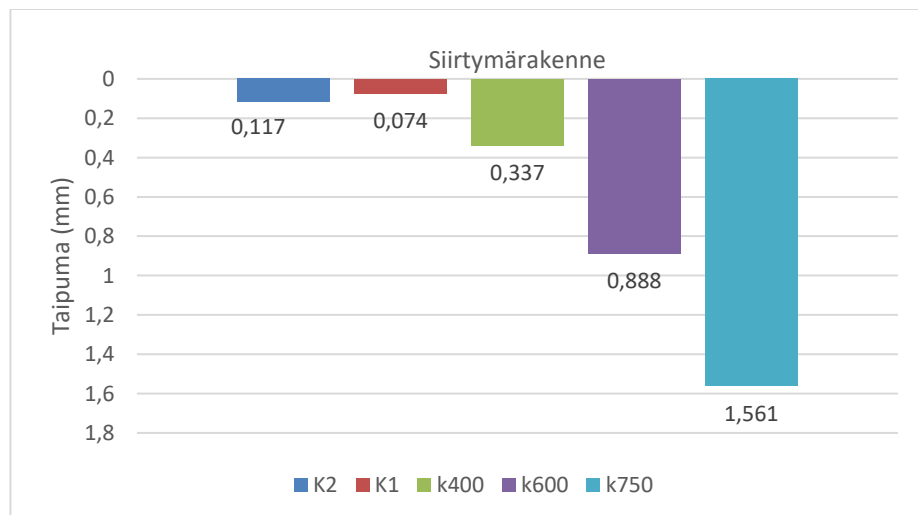
Samanlainen laskentapohja täytetään myös muille rakenteille. Yhdistetään kiintoraitteen tulokset sepeliraitteen tuloksiin samoista suureista, jotta voidaan esittää kuvaajat taipuman maksimille ja siirtymärakenteen jäykkyydelle. Lisätään kaikki arvot samoihin kuviin vertailun ja mielekkyyden vuoksi. Kuvassa 9 esitetään radan jäykkyyden muutosta eri siirtymärakenteiden osissa.



**Kuva 9.** Kokonaisjäykkyys eri siirtymärakenteen osissa.

Kuvasta 9 nähdään jäykkyyden muutoksen suuruus todellisuudessa sepeliraiteen ja kiintoraiteen välillä. Toisena nähdään, että ylimääräinen alusrakenteen vahvistaminen kiintoraidelaatan alla on haitaksi siirtymärakenteen toimivuudelle.

Kuvassa 10 esitetään arvoja taipuman maksimille eri siirtymärakenteen osissa. Kuvaajasta nähdään, että ratapölkkyjen väliä tihentämällä tavallisen suoran 750 mm jaosta käytännössä hyvin toteutettavaan 600 mm jakoon saadaan taipuman maksimi putoamaan 43 %. Kuitenkin ero kiintoraidelaatan arvoihin on merkittävän suuri.



**Kuva 10.** Taipuman maksimi eri siirtymärakenteen osissa.

Kuvan 10 mukaan siirtymärakenteen perusidea toteutuu myös taipumaa tarkastellessa, vaikka ero kiintoraidelaattaan on merkittävän suuri. Pelkästään ratapölkkyjä lisäämällä ja alusrakenteita tehostamalla ei voida täysin tasata kiintoraidelaatan ja sepeliraiteen ominaisuuksia.

### 3. SIIRTYMÄRAKENNETYYPI

Siirtymärakenne altistuu suurille rasituksille ja se tulee pitkällä aikavälillä vaatimaan hyvästä suunnittelusta huolimatta ylläpitoa. Ylläpidon määrää voidaan kuitenkin vähentää hyvin merkittävästi oikeilla ratkaisuilla. Siirtymärakenteen toteutukselle on maailmalla kehitetty monenlaisia keinoja, mutta yhtä ja parasta ei ole vielä todettu löytyneen. Siirtymärakenteet tulee aina ottaa huolellisen suunnittelun kohteeksi projektin mukaan [5]. Suomessa siirtymärakenteita valetulta laatalta sepeliraiteelle ei ole vielä toteutettu ja laboratoriokokeita ei ole tehty, joten käytännön kokemusta eri siirtymärakenteiden tyypeistä ei ole. Maailmalla toimivimmiksi ratkaisuuksi todettuja rakenteita arvioidaan seuraavissa alakappaleissa.

#### 3.1 Kaukalolaatta

Pohjois-Amerikassa kehitelty ja laajasti käyttöön otetun kaukalolaatan tavoite on toimia alusrakenteen vahvistuksena siirtymärakenteessa lähestyttäessä kiintoraidelaatan reunaa [5]. Kaukalolaatta on otettu käyttöön myös Tampereelle tulevalle raitiotiellä.

Yhdysvalloissa on yleisesti käytetty 6 metriä pitkää kaukalolaattaa. Kuuden metrin kaukalolaatta kasvattaa kuormituspisteessä ratamoduulia keskimäärin neljänneksellä. Kaukalolaatta valetaan Yhdysvalloissa kallistamaan radan pituussuunnassa syvemmälle sepeliradan puolella. Kiintoraidelaatan alla kaukalolaatta on yleensä 5 cm ylempänä kuin toisessa päässä raidesepelin alla. Tällä on tavoiteltu optimaalista asteittaista jäykkyyden kasvua toteutusmenetelmien vaikeutta kasvattamatta [5, s. 25]. Aiemmin todettiin, että siirtymärakenteen optimaalinen pituus on sidoksissa ajonopeuteen [19, s. 69]. Kaukalolaatan pituutta tuleekin muuttaa kohteen mukaisesti. Alhaisilla nopeuksilla 3 m pitkä siirtymärakenne hyötyy myös kaukalolaatasta, mutta vaikutus ei ole yhtä merkittävä. Yli 40 km/h nopeuksissa kaukalolaatan merkitys kasvaa ja siirtymärakenteenkin pituus tulisi olla 6 m. Kiintoraidelaatan ja sepeliraiteen vaihtopisteen lisäksi suunnittelussa täytyy huomioida, että siirtymärakenteeseen ei synny kokonaisjäykkyyksien erojen vuoksi toista epäjatkuvuuskohtaa rakenteen päähän, jossa kaukalolaatta päättyy ja avoin sepeliraita alkaa.

Raidesepelin kuivana pitäminen on todettu yhdeksi parhaista tavoista pitää raidesepelin ja radan muodonmuutokset vähäisinä [15, s. 4-51]. Tämä on Suomen olosuhteissa mahdollonta, mutta siirtymärakenteen mahdollisimman hyvät mahdollisuudet kuivumiselle voidaan olettaa tärkeiksi. Kaukalolaatan täytyy siis olla tarpeeksi syvällä raidesepelissä,

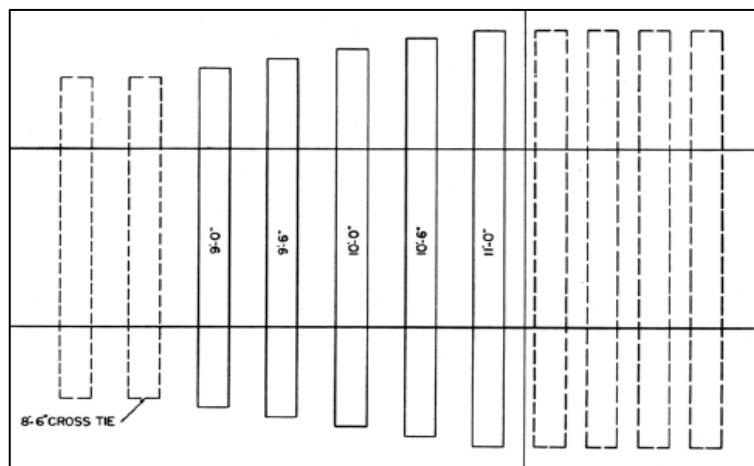
kapea ja avoin. Raidesepelekerroksen syvyys täytyy olla lähellä yleistä 35 cm raidesepelekerroksen vahvuutta ja silloinkin kaukalolaatan alueelle täytyy suunnitella erikseen kuivatusjärjestelmä.

Kaukalolaatta ei kuivatuksen lisäksi myös tukemisen kannalta saa olla liian lähellä ratapölkkyjen alapintaa. Koneellista tuentaa varten ratapölkyn alla täytyy olla vähintään 150 mm raidesepeleä ennen kaukalolaatan pintaa. Kaukalolaatta ei saa myöskään olla liian kapea, jotta ratapölkkyjen päiden alla olisi tarpeeksi tukevaa raidesepeleä. Raidesepelein katoaminen siirtymärakenteen alueelta johtaa pystygeometrian muutokseen ja jatkuvaan kunnossapitoon.

### 3.2 Ratapölkkyt

Raitiotiellä voidaan käyttää rautatieliikennettä kevyempää ratapölkkyä. Matalampien nopeuksien ja akselipainojen vuoksi lyhyemmät ratapölkkyt ovat kustannustehokas ratkaisu sepeliraiteella. Raitiotiellä voidaan myös käyttää suoralla radalla rautateitä pidempää ratapölkkyjen jakoväliä.

Rautateiden päistään pidempiä ratapölkkyjä hyödynnetään raitioteillä kumiylikäytävien kohdilla. Kustannustehokkaasti näitä pidempiä ratapölkkyjä voitaisiin hyödyntää myös siirtymärakenteissa. Pidempiä ratapölkkyjä on hyödynnetty muualla maailmassa, mutta viimeisimpien mallinnusten mukaan pelkästään päistään pidempien ratapölkkyjen käyttö lisää radan jäykkyyttä hyvin vähän. Pidempiä ratapölkkyjä täytyisikin käyttää yhdessä vapaata rataa tiheämmän ratapölkkyvälin kanssa tai poikkileikkaukseltaan suurempien ratapölkkyjen kanssa [5, s. 10]. Kuvan 11 mukaisilla ratapölkkyjen pidennyksillä saavutettiin 3 kertaa pienemmät kustannukset kunnossapidolle siltojen siirtymärakenteissa. Kyseinen rakenne on sittemmin otettu uudiskohteissa käyttöön [5, s. 9].



**Kuva 11.** Pölkkyjen pidennys kiintoraidelaattaa tai siltaa lähestyessä [5, s. 9].



Päistään pidemmät ratapölkkyt myös kasvattavat sepeliraiteen sivuttaisvastusta, joka vähentää lämpötilojen vaihtelusta johtuvaa hellekäyränä tunnettua vaakageometrian muu-  
tosta ja sen aiheuttamia riskejä [24, s. 4]. Pidempien ratapölkkyjen hyödyntämisessä  
siirtymärakenteessa täytyy ottaa huomioon alusrakenteet ja tukikerros. Mahdollisen kau-  
kalolaatan tulisi leventyä ratapölkkyjen mukaisesti lähempänä kiintoraidelaattaa, jotta se  
olisi aina ratapölkkyä leveämpi.

Raitiotien sepeliraiteella yleinen ratapölkkyjen jakoväli on 750 mm. Rautateillä yleinen  
jako on 610 mm. Tätä tiuhempaa väliä hyödynnetään kaarteissa raitiotiellä. Tiuhempi  
ratapölkkyjen jakoväli kasvattaa radan kokonaisjäykkyyttä ja vähentää raidese-  
pelin vastaanottamaa kuormitusta. Ratapölkkyvälin tihentäminen on toimiva ratkaisu myös siirty-  
märakenteisiin. Tiheämmän ratapölkkyvälin kanssa täytyy ottaa huomioon, että raidese-  
pelikerros täytyy pystyä tukemaan koneellisesti. Optimaalinen tuenta koneellisesti vaatii  
vapaata tilaa ratapölkkyjen väliin ainakin 400 mm. Tämä on mahdollista, kun ratapölkky-  
jen jakoväli on suurempi kuin 500 mm.

### 3.3 Pohjaimet

Ratapölkkyjen pohjaan asennettavat pohjaimet madaltavat radan jäykkyyttä ja rai-  
desepelin vahingoittumista. Materiaaliltaan pohjain voi esimerkiksi olla joustavaa poly-  
uretaania. Tiedetään, että raideseppelin murskautuminen ja katoaminen siirtymäraken-  
teesta aiheuttaa vain lisää murskautunutta raidesepeä ja pahempia muutoksia rata-  
geometriassa. Radan kokonaisjäykkyyttä normaaliin verrattuna tulisi kasvattaa aiemmin  
mainituin keinoin ja sitten laskea sitä neutraalimmaksi pohjaimien avulla [5, s. 15].



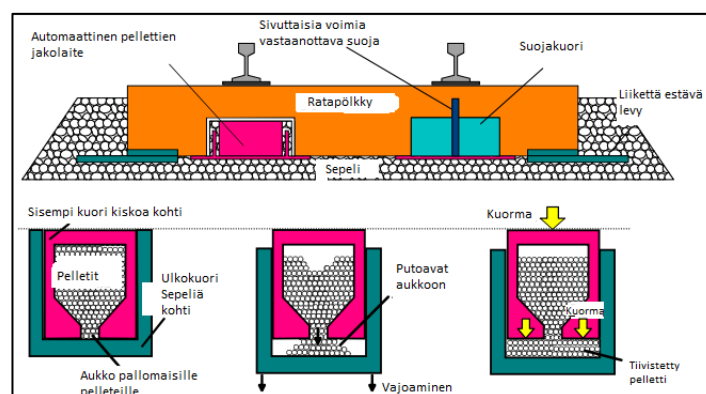
**Kuva 12.** Ratapölkkyyn asennetut pohjaimet [5, s. 15].

Pohjaimet asennetaan ratapölkyn päihin edellä olevan kuvan 12 mukaisesti. Ratapölkyn  
pohjan kantavalle alalle asennettu pohjain on kaikista kustannustehokkain. Pohjaimia on  
myös muihin siirtymärakenteen komponentteihin verrattuna helppo asentaa jälkikäteen.  
Pohjaimet eivät vaadi muutosta muuhun rataa, vaan ne voidaan asentaa käytettyihin  
rakenteisiin ilman muita kustannuksia. Pohjaimet suojaavat raidesepeä betonisilta rata-  
pölkkyiltä, jotka siirtymärakenteessa kohdistavat suuria kuormia raidesepeleille. Rai-  
desepelin kanssa kontaktissa tavallisen ratapölkyn pinta-alasta on vain korkeintaan 8 %.

Pohjain kasvattaa tätä alaa yli 400 %. Tutkimuksissa on havaittu, että pohjaimilla varustetuilla rataosuuksilla tarvitsee tehdä tuentatöitä, raidesepelin puhdistusta sekä vaihtoa huomattavasti vähemmän kuin pohjaimettomilla osuuksilla. Pohjainten valinnassa tulee huomioida käyttökohde. Pehmeät pohjaimet ovat ominaisia tärinän ja äänen vaimennukseen, kun jäykät ovat parempia geometrian säilytykseen ja radan kokonaisjäykkyyksien erojen tasoitukseen. Varsinkin kiintoraidelaatan siirtymärakenteessa tulee käyttää jäykkiä pohjaimia geometrian säilyttämiseksi [17, s. 87].

### 3.4 Automaattiset ratapölkkyt

Lupaavimpia uusia keksintöjä ratamaailmassa ovat automaattisesti asemaansa korjaavat ratapölkkyt. Ratapölkky koostuu kahdesta osasta, joiden väliin ratapölkky lisää automaattisesti mursketta korjatakseen asemaansa. Tällaisia automaattisia ratapölkkyjä on aloitettu kehittämään erityisesti korjaamaan roikkuvista ratapölkkyistä aiheutuvia ongelmia. Siirtymärakenteisiin tarkoitetut ratapölkkyt ovat vielä kehittelyasteella laboratoriotutkimuksissa, mutta ensimmäiset kokeet ovat lupailleet tästä toimivaa ratkaisua [12]. Kalliin ratkaisun toiminta on epäselvää Suomen olosuhteissa. Automaattiset ratapölkkyt tulisi ottaa talviolosuhteita varten erityiseen tutkimukseen ennen laajempaa kokeilua käytännössä. Japanilaisten tutkijoiden kehittämä AICS-ratapölkky on ensimmäisiä malleja automaattisesti asemaa korjaavasta ratapölkystä. Lähteen mukaisesta kuvasta muokattu versio kuvassa 13 havainnollistaa ratapölkyn toimintaa [12]. Kyseisestä mallista on jo myös kehitteillä seuraava versio.



**Kuva 13.** Automaattinen poikkeamia korjaava ratapölkky AICS. Kuva muokattu lähteestä [12].

Automaattiset ratapölkkyt ovat hyvä esimerkki perinteisen alan kyvystä luoda vieläkin täysin uusia innovaatioita. Kyseisen mallin mukainen rakenne on kuitenkin toimivuutensa ja hintatasonsa vuoksi kaukana käytännön hyödyntämisestä. Kehityksen kannalta on tärkeää, että uusia ja yhtä innovatiivisia ratkaisuja suunnitelleen sekä otetaan mahdollisuuksien mukaan kokeiltavaksi testiosuuksille.

## 4. TUKEMISEN VAIHTOEHDOT

Uusi sepeliraide rakennetaan 20 mm suunnitellun geometrian alapuolelle ja ylimääräistä raidesepeliä levitetään reilusti varsinkin ratapölkkyjen päihin. Tämän jälkeen sepeliraide tuetaan kerralla suunniteltuun geometriaan. Ylimääräistä tuentaa täytyy pyrkiä välttämään raidesepelin murskautumisen ja jauhautumisen takia [16, s.109]. Tukemistyötä tehdään erilaisilla laitteilla ja menetelmillä.

### 4.1 Koneellinen tuenta

Raiteen tuenta suoritetaan pääosin raiteentuentakoneella. Kuvan 14 mukainen tuentakone sisältää mittauslaitteen, joka toimii tauotta tukemistyön aikana. Tuentakone pystyy samaan aikaan siirtämään rataa sivusuunnassa ja nostamaan määritetyn geometrian mukaiseen korkeuteen. Tukemisen suorittavat neljä tuentahakkua, jotka siirtävät käsiteltävän ratapölkyn molemmissa päissä raidesepeliä ratapölkyn alle rataakiskon suuntaisella liikkeellä. Kone on pitkillä ja suorilla sepeliraideosuuksilla kustannustehokkain tuentamenetelmä nopeutensa ja tarkkuutensa vuoksi. Laite kykenee tukemaan, jopa 400 m sepe-liraidetta tunnissa [20].



**Kuva 14.** Raiteentuentakone Plassermatic 08-275 4ZW Tampereen raitioteillä.

Kaupungeissa raitioteille tulee välttämättä jyrkkiä kaarteita, joita kone ei kykene asettamaan oikeaan asentoon, koska mittauslaite kykenee toimimaan vain kaarissa, joiden kaarresäde on 50 m tai enemmän. Siirtymärakenteet tulisi aina laadun varmistamiseksi rakentaa suoraan. Tuentakoneen lavat iskevät raidesepelissä olevan ratapölkyn alle vajaa 10 cm verran, joten siirtymärakenteiden mahdollinen kaukalolaatta ei häiritse tuentakoneen työskentelyä siirtymärakenteissa.

Raiteentuentakoneen kaarteiden tuentakyvyn rajoittuneisuuden vuoksi koneellinen tuenta voidaan suorittaa myös kaivinkoneen tukemispäällä. Kuvan 15 mukainen tukemispää kykenee työmaalla tehtyjen havaintojen perusteella tukemaan raidesepelin jopa tiiviimmin kuin tuentakone. Se ei pysty mittaamaan itsenäisesti raiteenasentoa yhtä tarkasti tuennan aikana kuin tuentakone mittaussvaununsa kanssa. Toimintaperiaatteeltaan tuentapään lavat toimivat samalla liikkeellä kuin tuentakone.



**Kuva 15.** Kaivinkoneen tukemispää.

Tukemispää kykenee tukemaan vain yhden raiteen kerrallaan, kun tukemiskone nostaa samaa ratapölkkyä molemmista päistä ja tukee koko rataa kerrallaan. Tämä korostaa jatkuvan mittauksen tärkeyttä tuentapäällä. Tukeminen on kaivinkoneen tuentapäällä siis hitaampaa ja geometrian kannalta heikompaa, mutta valmiin raidesepelin tiiviys on korkeampi. Työryhmän koon täytyy molemmilla koneellisilla menetelmillä olla vähintään kolme. Molemmat koneelliset tuennan menetelmät vaativat selkeän näkyvyyden tuettavaan ratapölkkyyn ja vähintään 40 cm vapaata tilaa ratapölkyn pään molemmin puolin, jotta tuenta onnistuisi laitteen suunnitellun menetelmän mukaisesti. Tämä vapaa tila syntyy, kun ratapölkkyjen jako on vähintään k600.

## 4.2 Käsintuenta

Käsintuenta suoritetaan käsikäyttöisillä tukemiskoneilla kuten kuvassa 16 näkyvä laite. Käsikäyttöisillä tuentakoneilla raidesepelin tiivistäminen itse ratapölkyn alle on haastavaa, koska käsikäyttöiset tuentalaitteet puristavat raidesepeliä värähtelemällä pienempään kasaan suoraan laitteen käyttösuunnassa eli lähes pystysuorassa suunnassa, eikä



raiteen pituussuunnassa koneellisen tuennan mukaisesti. Raidetta käsintuennassa nostetaan kaivinkoneella tai tunkilla. Käsintuenta murskaa raidesepeliä liikeratansa vuoksi koneellista tuentaa enemmän ja liikenneviraston ohjeiden mukaisesti käsintuenta voidaan soveltaa vain pistemäisesti yksittäisissä kohteissa [14].

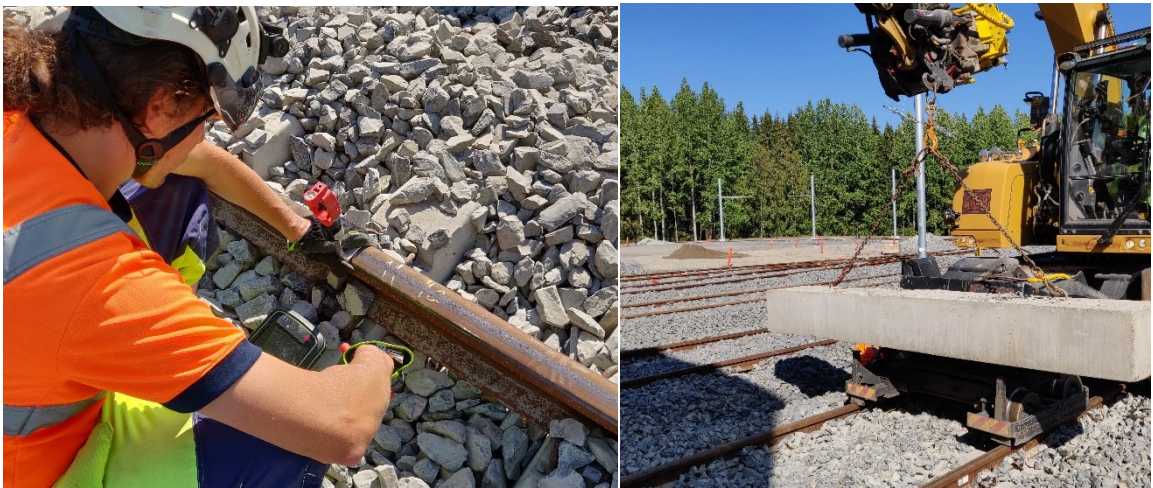


**Kuva 16.** Radan tuentaa Robelilla.

Käsintuenta on pakko soveltaa tilanteissa, joissa koneellista tuentaa ei voida toteuttaa. Tällaiset tilanteet syntyvät esimerkiksi, kun ratapölkkyjen välissä on vapaata tilaa alle 35 cm. Radalla ja varsinkin siirtymärakenteissa lyhyempien jakovälien kuin k600 käyttäminen aiheuttaa useita laadullisia riskejä. Raidesepeliä joudutaan tukemaan käsintuennalla ohjeiden vastaisesti pitkältä yhtenäiseltä matkalta. Samalla suurten rasisutusten alueella raidesepeli murskautuu tarpeettoman paljon jo rakennusvaiheessa, mikä nopeuttaa pysyvien muodonmuutosten syntymistä. Työvaiheen kesto ja rasitus työntekijälle on moninkertainen koneellisiin tuentoihin verrattuna, vaikka työryhmän koko täytyy tässäkin olla vähintään kolme henkilöä. Käsintuennan laatu on koneelliseen tuentaan verrattuna hyvin vaihtelevaa kuten yleisesti kaikki muukin käsityö. Sepeliraiteen tukeminen tulisi suorittaa koneellisesti ja tasaisesti edeten ylimääräistä raidesepelin murskautumista välttämällä, varsinkin uutta rataa rakennettaessa.

## 5. KENTTÄMITTAUKSET RAITEEN PAINUMASTA

Osana tutkimusta suoritettiin kenttämittauksia raiteen painumalle Tampereen raitiotien varikon piha-alueella Hervannassa. Tutkimuksessa mitattiin takymetrillä kuormitettujen ratapölkkyjen kohdalta kiskon painumia ja kuormittamattomina samojen ratapölkkyjen palautumia. Jokaisessa mittauksessa ja rakenteessa 1. mittauspiste sijaitsi kiintoraide-laatan reunalla ja kaikki seuraavat mittauspisteet joka kolmannen ratapölkyn kohdalla sepeliraiteella. Viimeiset mittauspisteet sijaitsivat siirtymärakenteen mukaan 5,7 m tai 5,3 m päässä kiintoraidelaatasta. Mittauspisteissä mitattiin aina erikseen radan molempien kiskojen arvot. Kuormitus suoritettiin kiskopyöräkaivinkoneella ja lisäpainolla. Mittaukset suoritettiin etuakselin kohdalta, jonka päällä ylimääräistä painoa pidettiin. Kuormituksen aikana ratapölkyllä oli akselipainoa kenttämittauksessa 133 kN. Tämä akselipaino on melko lähellä raitiotielle käytettävää mitoittavaa akselipainoa 140 kN, joten mittauksen tulokset tulevat näyttämään realistisesti liikennöinnin aikaisia muodonmuutoksia radassa. Kuva 17 hahmottaa mittaustilannetta.



**Kuva 17.** Mittaaja takymetrin prisman kanssa ja kiskopyöräkaivinkone lisäpainolla.

Kenttämittauksessa tutkittiin päällysrakenteen osalta kahta erilaista rakennetta siirtymärakenteelle. Ensimmäinen rakenne on tässä tutkimuksessa suositeltu ja tutkittu 600 mm jaolla tehty siirtymärakenne, jota päällysrakenteen osalta hahmottaa kuva 2. Alusrakenteiden osalta tutkimuksen radassa ei ole kaukalolaattaa, koska tutkitulla varikkoalueella liikennöintinopeudet ovat hyvin alhaisia. Tämä rakenne oli helppo toteuttaa ja se voitiin tukea koneellisesti määräysten mukaisesti. Toinen kenttämittauksen rakenteista on portaittaisen ratapölkkyjen jaon pidemmälle vievä siirtymärakenne, joka tuetaan ensimmäisen 3 m osalta käsin. Alusrakenteiltaan rakenteet olivat täysin vastaavia. Molemmista rakennetyypeistä tutkittiin kahta erillistä rataa. Kaikki tutkitut radat olivat tuettuja ja jatku-

vaksi hitsattuja. Tuennat oli suoritettu kiskopyöräkaivinkoneeseen kiinnitettävällä tukemispäällä ja käsituennalla. Ensimmäinen rakenne olisi mahdollista myös toteuttaa itsenäisellä raiteen tukemiskoneella, jota tässä mittauksessa ei ollut vielä mahdollista käyttää. Mittauskalusto pysyi samana läpi tutkimuksen. Lista tutkittujen ratojen mittauspisteistä selviää alta taulukosta 8.

**Taulukko 8.** *Mittauspisteet, jakovälit ja etäisyydet.*

Pölkky (n:ro)	Keskipisteen etäisyys kiintoraidelaatasta (m) ja jakoväli		Mittauspiste (n:ro)	
	k400	k600	k400	k600
0	0	0	1	1
	300	500		
1	0,3	0,5		
	400	600		
2	0,7	1,1		
	400	600		
3	1,1	1,7	2	2
	400	600		
4	1,5	2,3		
	400	600		
5	1,9	2,9		
	400	600		
6	2,3	3,5	3	3
	400	600		
7	2,7	4,1		
	600	600		
8	3,3	4,7		
	600	600		
9	3,9	5,3	4	4
	600	600		
10	4,5	5,9		
	600	750		
11	5,1	6,65		
	600	750		
12	5,7	7,4	5	
	750	750		
13	6,45	8,15		

Ensimmäisenä tutkimuksena merkittiin mitattavalta radalta mittauspaikat. Mittauspisteiden ratapölkkyjen kohdalle merkittiin kuormittamattoman ja tuetun radan kulkupinnan korkeus. Molempien kiskojen korkeus merkittiin erikseen saman ratapölkyn eri päihin. Tätä lukua pidettiin kaikissa tutkittavissa radoissa lähtöarvona ja vertailussa lukuna 0.

Kuormitus lisättiin mittauspisteisiin kiintoraidelaatan päästä alkaen ja jokaiseen mittauspisteeseen merkittiin radan molemmille puolille vertailuarvo korkeuden muutoksesta kuormittamattomaan rataan verrattuna. Tämä painuman arvo merkittiin ylös jokaisessa mittauksessa palautuvana painumana. Ensimmäisen mittauksen jälkeen tutkittava raide vapautettiin kuormituksesta. Tämän jälkeen jokaisesta pisteestä tarkastettiin radan korkeus kuormituksen jälkeen ja palautuiko se lähtöarvoonsa. Kenttämittausten aikana raide palautui ensimmäisen mittauksen jälkeen kuormittamattomaan lähtökorkeuteensa 29 kertaa kaikista 32:sta mittauksesta eli 91 % varmuudella. Kaikki 3 pistettä jakautuivat

eri raiteille. Tämä osoittaa, että tukeminen oli suoritettu kaikissa raiteissa mahdollisuuksien rajoissa todella hyvin.

Kiskopyöräkaivinkoneella ajettiin lisäpainon kanssa siirtymärakenteen läpi 10 kertaa ennen kuin raiteella suoritettiin toinen kierros mittauksia. Tällä simuloitiin kevyesti liikennöinnin tuomaa rasitusta ja geometrian muutosta raiteessa, kun raide asettuu raidesepeeliin. Yliajoilla saavutettiin vajaan 2700 Brt kuormitusrasitus kaikkialle siirtymärakenteeseen. Toisen kierroksen alussa otettiin jälleen ylös lähtöarvot jokaisesta mittauspisteestä, jonka jälkeen suoritettiin ensimmäisen kierroksen tavalla kuormituksen alaisen palautuvan painuman mittaukset.

Toisesta mittauskierroksesta otettiin ylös palautuvan painuman arvo kierroksen alun lähtöarvoon verrattuna sekä yhteispainuman suuruus, joka tarkoittaa korkeuden muutosta toisen kierroksen kuormitetun raiteen ja alun kuormittamattoman raiteen välillä. Taulukko 9 on esimerkkinä kenttämittauksen pöytäkirjasta.

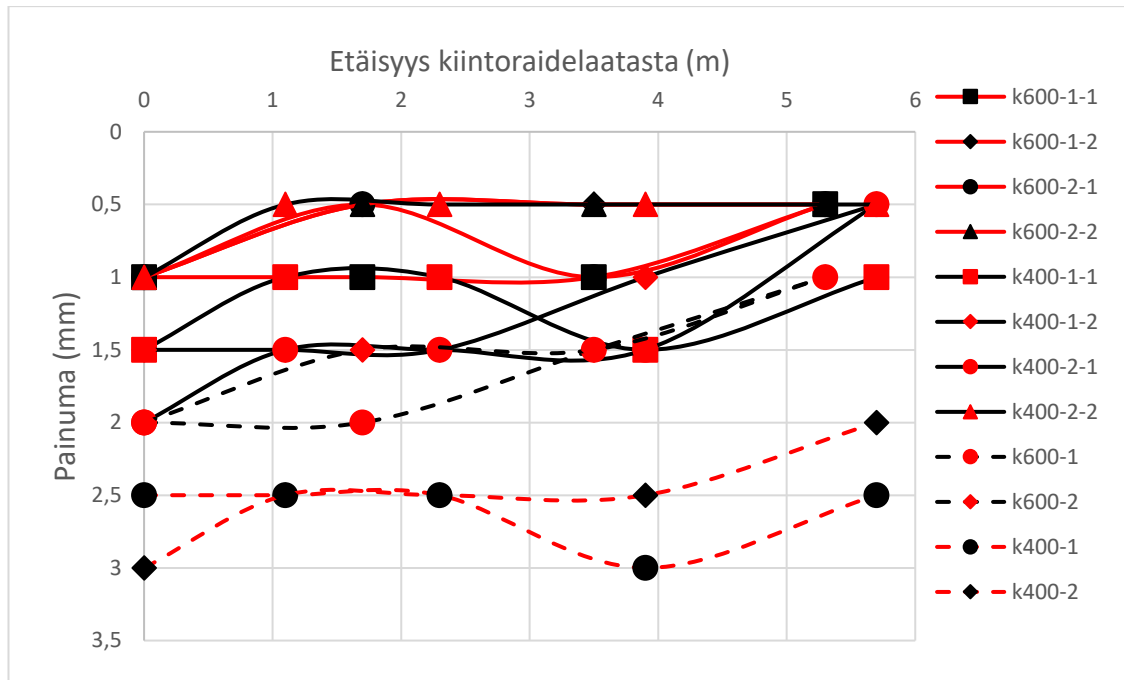
**Taulukko 9.** *Mittauspöytäkirja ensimmäisenä mitatusta raiteesta.*

Painuman vertailuarvo (mm):				Lähtöarvo		Kuormitus		Yhteis	
Raide	Jako (mm)	Mittauskerta	Mittauspiste	Etelä	Pohjoinen	Etelä	Pohjoinen	Etelä	Pohjoinen
R12	k600-1	1.	1	0	0	1	1	1	1
		k600-1-1	2	0	0	1	1	1	1
			3	0	0	1	1	1	1
			4	0	0	0	1	0	1
		2.	1	1	1	1	1	2	2
		k600-1-2	2	1	2	1	0	2	2
			3	1	1	1	0	2	1
			4	1	1	0	1	1	1

Taulukossa 9 sarake *raide* tarkoittaa raiteen numeroa Tampereen raitiotien varikolla. *Jako* kuvaa siirtymärakenteen tyyppiä, eli taulukossa 9 on mitattu 600 mm jaolla toteutettua siirtymärakennetta. *Mittauskertojen* pidempiä tunnuksia käytetään kuvaajissa. *Mittauspisteet* ovat aiemman taulukon 8 mukaisia pisteitä siirtymärakenteessa. Vertailuarvojen otsikot *etelä* ja *pohjoinen* tarkoittavat mitatun kiskon sijaintia kartalla toiseen nähden. Kuvaajia varten jokaiselle mittauspisteelle lasketaan mittauskerran painuman keskiarvo laskemalla pisteen *eteläisen* ja *pohjoisen* kiskon painuma yhteen ja jakamalla tulos kahdella.

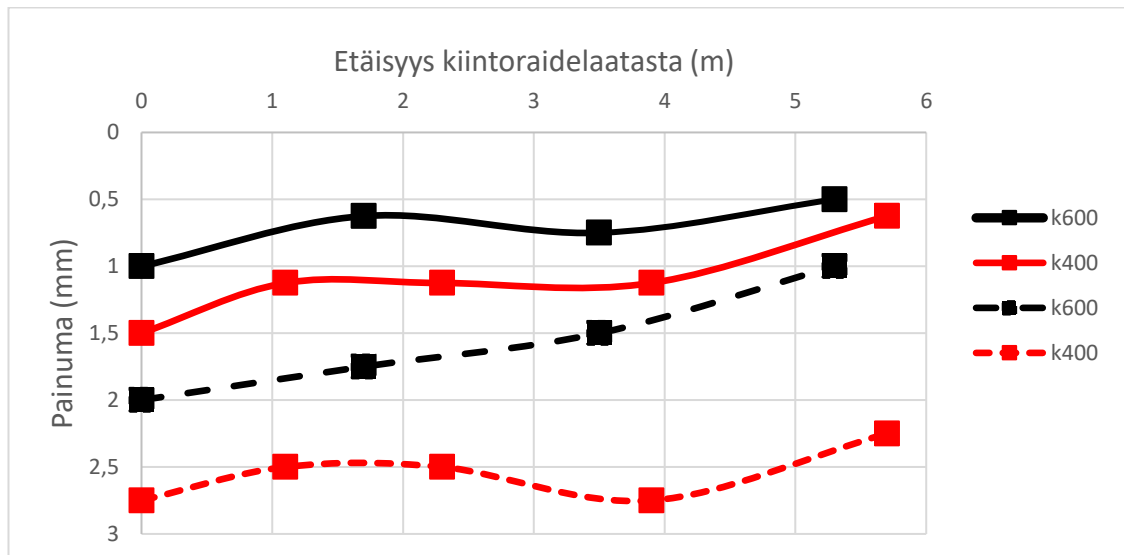
Mittauspöytäkirjojen arvoista saadaan koostettua kuvaajat palautuvalle painumalle ja yhteispainumalle. Kuvassa 18 esitetään kaikkien mittauskertojen palautuvan painuman arvot sekä yhteispainumien arvot. Kuvassa 18 pisteet on yhdistetty tasoitetulla viivalla mielekkyyden vuoksi. Yhteispainumat on merkitty katkoviivoilla ja palautuvat painumat tasapaksuilla viivoilla.





**Kuva 18.** Kenttämittausten mukaiset painumat eri siirtymärakenteissa.

Kuvan 18 kuvaajat todistavat, että samalla rakenteella toteutetut radat käyttäytyvät samalla tavalla. Rakentamisen ja mittauksen toteutuksessa ei ole tapahtunut huomattavia virheitä. Nämä kuvaajat sisältävät paljon dataa, mutta selkeyden vuoksi yhdistetään samalla jaolla toteutetut siirtymärakenteet. Palautuvien painumien keskiarvot jokaisessa mittauspisteessä ja yhteispainumat selviävät kuvan 19 kuvaajista.



**Kuva 19.** Kenttämittausten keskiarvot siirtymärakenteiden painumille.

Kuvan 19 kuvaajasta voidaan todeta tuennan tärkeys siirtymärakenteen toimivuudelle. Teoriassa jäykempi ja kantavampi siirtymärakenne 400 mm ratapölkkyjaolla toimii käy-

tännössä heikommin, koska sen toteuttaminen maastossa ei onnistu standardien mukaisesti. Kuvaajista näkee myös suoraan, että vapaan sepeliraiteen puolella rata taipuu aina vähemmän kuin kiintoraidelaatan reunalla. Tämä johtuu osaltaan kiintoraidelaatan tukikerroksen elastisuudesta, mutta myös tukemisen vapaudesta kauempana sepeliraitteella. Valmiilla uudella radalla sallitaan enintään 3 mm palautuva painuma [14, s.18]. Mittaustulokset kummallekaan rakennetyypille eivät siis ole Liikenneviraston ohjeen vastaisia. Tutkimuksen radoissa ei ollut alusrakenteissa kaukalolaattaa, jonka vaikutus oletettavasti parantaisi molempia tuloksia merkittävästi.

## 6. TULOKSET

Kenttätutkimuksen havainnot tukevat kirjallisuuslähteistä saatuja tuloksia. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää keinot ja mahdollisuudet siirtymärakenteiden yksilölliselle suunnittelulle, joka takaisi laadukkaamman julkisen liikenteen rakenteen sekä säästöjä kustannuksissa pitkällä aikavälillä. Työn tavoitteet saavutettiin ja tutkimuksessa esitetyt perusteita tulee käyttää siirtymärakenteiden suunnittelussa raitiotiellä.

### 6.1 Pitkäaikaisvaikutukset

Sepeliraide tulee aina vaatimaan ylläpitoa. Raidesepeliin kertyy epäpuhtauksia, jotka sadeiden ja talven lumien kanssa johtavat raidesepelin tiivistymiseen. Työmaalle tulevan raidesepelin laatua tulee valvoa ja varmistaa toimittajan kanssa, että raidesepelin raekoko on tasaisesti tarpeeksi suurta. Pilaantunut ja hienontunutta ainetta sisältävä raidesepeli tulee seuloa uudestaan ennen rataa levittämistä. Oikeilla kuivatusjärjestelmillä ja raidesepelin puhtauden säilyttämisellä radan kunnossapidon tarpeet laskevat eniten. Pohjainten käytöllä raidesepelin jauhaantuminen laskee niin huomattavasti, että suurten rasiusten siirtymärakenteissa pitkäaikaisvaikutukset ovat huomattavan vähäiset.

Liikennöin aikana radan asettuminen aiheuttaa pitkällä aikavälillä pysyviä muodonmuutoksia ratapölkkyjen päissä avonaisella radalla ja siirtymärakenteissa, vaikka raidesepeli ei murskautuisikaan, mutta ylimääräistä radan uudelleentuentaä täytyy välttää. Uudelleentuenan yhteydessä tulisi suorittaa tarvittava raidesepelin vaihtaminen uuteen puhtaaseen kaikkialla missä raidesepeli on jauhaantunut tai kerännyt epäpuhtauksia. Siirtymärakenteet ovat riskialttiimmat kohdat ja pitkäaikaisvaikutusten seurannalle tulee suorittaa suunnitelma aluekohtaisesti.

### 6.2 Kustannukset

Siirtymärakenteen rakentamisen aikaisissa kustannuksissa suurimmat kustannukset tulevat kaukalolaatan ja ratapölkkyjen materiaaleista. Sijainnille optimaalisen mittaisella kaukalolaatalla saadaan olennaisesti laskettua kunnossapidosta johtuvia kustannuksia, koska pohjainten kanssa yhdessä nämä rakenteet minimoivat siirtymärakenteessa tapahtuvan raidesepelin karkaamisen, jauhaantumisen ja kuorman aiheuttaman asettumisen.

Siirtymärakenteen tukeminen onnistuu koneellisesti säilyttämällä ratapölkkyjen jakovälin suurempana kuin k500. Kenttätutkimusten mukaan tiuhempi jakoväli ei hyödytä rakenteen kantavuutta ja väljemmällä jaolla saadaan huomattavia säästöjä materiaalikustanuksiin sekä työvaiheen kestoon. Koneellinen tuenta väljemmillä jaoilla on olennaisesti nopeampaa, laadukkaampaa ja työntekijöiden fyysistä rasitusta säästävää.

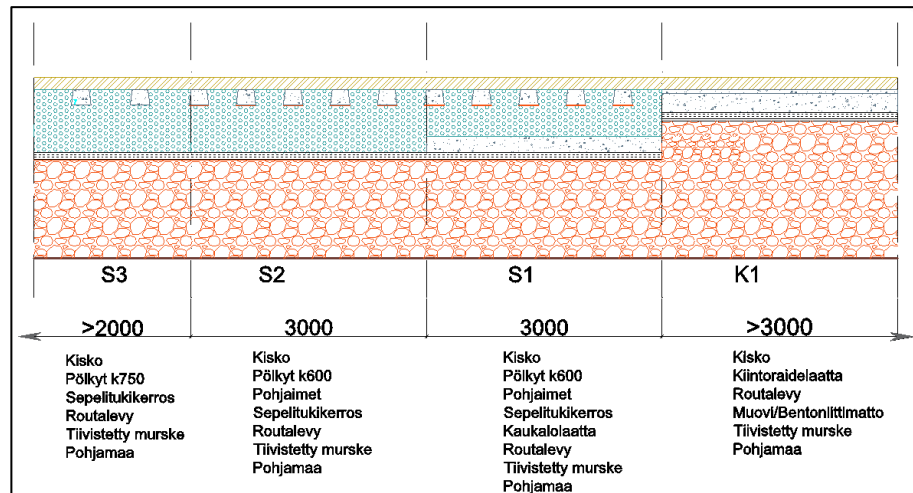
### 6.3 Rakenteen valinta

Siirtymärakenteen suunnittelu tulee optimoinnin mukaisesti toteuttaa alla olevan taulukon 10 mukaisten ja tässä tutkimuksessa määritettyjen kohtien avulla. Elementtimenettelmää hyödyntävillä ohjelmilla voitaisiin vielä mallintaa eri siirtymärakenteita niiden toimivuuden varmistamiseksi. Näiden FEM-ohjelmien käyttö ei kuitenkaan kuulu tämän tutkimuksen laajuuteen.

**Taulukko 10.** *Siirtymärakenteen optimoinnin askeleet.*

- 1. Liikennöinti nopeuden mukainen siirtymärakenteen pituuden määrittäminen**
- 2. Alusrakenteen ja kaukalolaatan suunnittelu kuivatusjärjestelmään tukemisen reunaehdot huomioiden**
- 3. Päälysrakenteen ratapölkkyjen jakaminen siirtymärakenteen pituudelle jakovälejä tihentäen ja pituuksia kasvattaen tukemisen reunaehdot huomioiden**
- 4. Elastisen materiaalin lisääminen rasitetuimpiin rakenteen kohtiin kunnossapidon vähentämiseksi**
- 5. Rakenteen mallintaminen epäjatkuvuuskohtien välttämiseksi**
- 6. Rakenteen toteutus standardien mukaisesti koneellista tuentaa hyödyntäen**

Tutkimusten perusteella voidaan esimerkkinä siirtymärakenteelle suositella alla olevan kuvan 20 mukaista toteutusta, jolla saadaan kestävä ja laadukas rakenne liikennöinti nopeuden ollessa 40 km/h. Osuuden S3 tavanomainen sepeliraide muuttuu sepeliraiteen osuuteen S2, jossa ratapölkkyjen jakoväliä on tihennetty ja ratapölkkyihin on asennettu pohjaimet. Kaukalolaatta lisätään rakenteeseen siirtymärakenteen osassa S1. Tässä rakenteen osassa alusrakenteen kuivatuksen suunnittelu tulee toteuttaa huolellisesti. Sepeliraide vaihtuu kiintoraiteeksi 6 m pitkän siirtymärakenteen jälkeen. Tasainen kokonaisjäykkyuden muutos radassa toteutuu pitkäaikaisvaikutukset huomioiden tutkimusten mukaisesti alla olevan kuvan 20 mukaisesti.



**Kuva 20.** Sijaintiinsa optimoidun siirtymärakenteen pituusleikkaus.

Päällysrakennetyypin vaihtumispisteessä osien S1 ja K1 välissä sepeliraiteen kaukalolaatta voidaan suunnitella myös jatkumaan kiintoraidelaatan alle, jos alusrakenteen laadun vuoksi on syytä olettaa, että vaihtopisteessä laattojen reunat lähtisivät painumaan. Laattojen päätyjen painuminen synnyttäisi epätoivotun epäjatkuvuuskohdan raiteeseen. Valettujen laattojen limittäminen kasvattaa vaihtopisteen kokonaisjäykkyyden eroa merkittävästi, mutta poistaa mahdollisen laattojen päätyjen painumisesta syntyvän riskin. Uutta rataa rakennettaessa alusrakenteet voidaan tuottaa kuitenkin tarpeeksi laadukkaasti, jonka ansiosta laattojen päiden painuminen voidaan arvioida mitättömän vähäiseksi.

## 6.4 Virhearviointi

Kirjallisuusselvitysten mukaan siirtymärakenteita tehdään hyvin eri menetelmin eri puolilla maailmaa ja Suomen olosuhteissa kyseisiä rakenteita ei ole vielä toteutettu. Kirjallisuuslähteiden yhtenevyys parhaiksi todetuissa siirtymärakenteen komponenteissa oli merkittävän suurta ja kyseiset rakenteet osoittivat itsensä kannattaviksi sijoituksiksi pitkällä aikavälillä kunnossapidon kustannusten sekä raitiotielle tärkeän matkustamisen laadun ja mukavuuden vuoksi. Pohjaimissa, kiintoraidelaatalla kiskon ympärillä ja rata-pölkkyjen kiinnitysjärjestelmissä oleva elastinen kumi tulee ajan kanssa väsymään ja kulumaan. Tämä tulee pitkällä aikavälillä aiheuttamaan todennäköisesti eniten muodonmuutoksia kiintoraidelaatassa, koska siellä elastista kumia on paksuudeltaan eniten.

Laboratio-olosuhteissa suoritettavia mittauksia eri sääolosuhteissa ja suurten kuormien aiheuttaman pitkän aikavälin vaikutuksia tulisi tutkia. Myös FEM-ohjelmien käyttö rakenteiden mallintamiseen poistaisi mahdollisia suunnitteluvirheitä. Molemmat lisätutkimukset ovat siirtymärakenteiden suunnittelun ja optimoinnin kehityksen kannalta hyviä kohteita seuraaville selvityksille.

## 7. YHTEENVETO

Siirtymärakenteiden suunnittelussa tulee ottaa huomioon rakenteen sijainnin mukainen liikennöintinopeus, työmenetelmien toteutuskelpoisuus ja pitkäaikaisvaikutukset. Siirtymärakenteen heikon toteutuksen aiheuttamat roikkuvat ratapölkyt synnyttävät ongelmia matkustuksen mukavuudelle ja rakenteiden kestävyydelle sekä kustannuksia kunnossapidolle.

Suosituksen mukainen siirtymärakenteen pituus synnyttää suurimmat säästöt tai vakavat ongelmat siirtymärakenteissa. Liian lyhyt siirtymärakenne korkeiden nopeuksien alueilla ei ehdi tasaaman kuormaa tarpeeksi radan jäykkyyden muuttuessa merkittävän suuresti. Toisaalta samalla menetelmällä toteutetut siirtymärakenteet matalan nopeuden alueilla aiheuttavat tarpeettoman paljon ylimääräisiä kuluja rakentaessa.

Alusrakenne tulee toteuttaa siirtymärakenteen alla kaukalolaatan kanssa ja levykuormituslaitteella suoritettavia kenttämittauksia hyödyntäen. Uutta rataa rakentaessa laadukkaat alusrakenteet on helppo toteuttaa ja varsinkin siirtymärakenteissa oikein tiivistetyt rakennekerrokset ovat tärkeässä osassa radan muodonmuutoksien minimoinnissa pitkällä aikavälillä. Kaukalolaatan sijoittamisesta todettiin teorian mukaisesti, että se kasvattaa kokonaisjäykkyyttä vaihtopisteessä merkittävästi. Laadukkaiden alusrakenteiden ja tiivistetyn maan kanssa ei ole syytä jatkaa kaukalolaattaa kiintoraidelaatan alle. Kiintoraidelaatan alusrakenne voidaan jatkaa muuttumattomana sepeliraiteen alkuun asti. Kaukalolaatan kohdalla kuivatusjärjestelmä tulee suunnitella tarkasti, jotta vesi ei jää kaukalolaatan päälle seisomaan.

Ratapölkkyjaon tihentäminen avoimen radan 750 mm jakovälistä aina 600 mm asti tuottaa rakentamisen toteutettavuudeltaan ja radan pystysuuntaisen jäykkyyden lisäämiseltä parhaan ratkaisun. Ylikäytävillä ja rautateillä käytettävien päistään pidempien ratapölkkyjen käyttäminen yhdessä tiheämmän ratapölkkyvälin kanssa tuottaa kustannustehokaimman ja jäykistävimmän ratkaisun siirtymärakenteeseen. Pidempien ratapölkkyjen kanssa täytyy kaukalolaatta toteuttaa samassa suhteessa leveämpänä, jotta kuormien jakautuminen pysyy laatan yläpuolella.

Radan jäykkyyden lisääminen mainituin tavoin on paras menetelmä siirtymärakenteen toteutukselle lyhyellä aikavälillä ja nopeita tuloksia varten. Kunnossapitoa, rakenteen kestävyyttä ja rakentamisen laatua ajatellen pohjainten käyttö on oleellista siirtymärakenteessa. Kaikki kirjallisuuslähteet osoittivat samoja säästöjä kunnossapidossa ja geometrian säilymisessä jäykkiä pohjaimia käytettäessä. Pohjaimia käytetäänkin Suomessa

jo vähäisesti siltarakenteiden siirtymä rakenteissa. Niiden asennus aiemmin rakennetulle radalle on myös jälkikäteen helppoa, koska pelkästään ratapölkkyjä lisäämällä ja alusrakenteita tehostamalla ei voida tasata kiintoraidelaatan ja sepeliraitteen olennaisia ominaisuuksia.

Tukeminen tulee suorittaa ajankäytön, työn tasaisen laadukkuuden ja työntekijöiden työkyvyn säilyttämisen kannalta koneellisesti joko tuentakoneella tai kaivinkoneen tuentapäällä. Tuennan onnistumisen merkitystä tukivat onnistuneet kenttämittausten tulokset. Käsintuenta tulisi käyttää vain pistemäisesti korjausta vaativissa kohdissa. Tuennan ja ylikäytävien yhteydessä raidesepelin puhtautta ja jauhaantumista tulee seurata, jotta kunnossapidon menetelmin rataa ei tarvitse korjata heti rakentamisen jälkeen uudelleen.

# LÄHTEET

- [1] A. Kalliainen, H. Luomala, T. Jäniskangas, A. Nurmikolu, P. Kolisoja, Radan eristys- ja välikerrosten tiiviys- ja kantavuustutkimus, Liikennevirasto, 2011.
- [2] B. Langer, S. Timoshenko, Stresses in Railroad Track, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1932.
- [3] B. Lechner, Design and Layout of Ballastless Track Systems Using Unbound Base Course Layers, 2007.
- [4] Betonirakenteiden materiaaliominaisuudet, A-Insinöörit Suunnittelu Oy, Väylävirasto, Saatavissa (viitattu 9.11.2019): [https://julkaisut.vayla.fi/sillat/euro-code/Marttila\\_Materiaaliominaisuudet.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/sillat/euro-code/Marttila_Materiaaliominaisuudet.pdf).
- [5] D. Li, D. Read, Design of Track Transitions, The National Academics Press, 2006.
- [6] D. Uzarski, Introduction to Railroad Track Structural Design, Illinois Railroad Engineering Program, 2009.
- [7] F. Hahrs, J. Malmberg, M. Mohlen, Dimensioning of slabs for high-speed railway lines, 2016.
- [8] Finnfoam, Finnfoam routaeristeet, Saatavissa (viitattu 9.11.2019): <https://www.finnfoam.fi/suunnittelijoille>.
- [9] G. Raymond, Analysis of Track Support and Subgrade Stability, 1985.
- [10] H. Luomala, A. Nurmikolu, O. Peltokangas, Radan pystysuuntainen kokonaisjäykkyys ja sen mittaaminen, Liikennevirasto, 2013.
- [11] InfraRYL 2010 Infrarakenteiden yleiset laatuvaatimukset. Osa 1: Väylät ja alueet.
- [12] K. Muramoto, T. Nakamura, T. Sakurai, A Study of Track Irregularity Prevention Methods for the Transition Zone between Different Track Structures, 2012.
- [13] K. Pylkkänen, A. Nurmikolu, Routa ja routiminen ratarakenteessa, Liikennevirasto, 2015.
- [14] Liikennevirasto, Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 3, Radan rakenne, 2016.
- [15] NASEM, Track Design Handbook for Light Rail Transit, The National Academies Press, 2012.
- [16] O. Asp, Tukikerroksettomien rautatiesiltakansien kehittäminen, Liikennevirasto, 2011.
- [17] P. Kolisoja, P. Kuula, H. Luomala, E. Pulkkinen, Tukikerroksen toiminnan kehittäminen, Liikennevirasto, 2017.



- [18] Pandrol Q-Track, Elastic prefabricated resin bonded rubber profiles for embedded Ballastless track system, Saatavissa (viitattu 9.11.2019): <https://www.pandrol.com/product/q-track/>.
- [19] R. Karlsson, Tekniska Systemkrav För Ostlänken, 2014.
- [20] Raiteentuentakone Plassermatic 08-275 4ZW, Spitzke, Saatavissa (viitattu 9.11.2019): <https://www.technikpark.com/en/machines/track-laying/tamping-lifting-straightening-stabilising/08-275-4-zwy-08-275-zw-sh/>
- [21] Ratahallintokeskus, Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO) osa 11, Radan päällysrakenne, 2002.
- [22] Tampereen yliopiston tekniikan alan opinnäytteiden kirjoitusohje, (2018). Tampereen yliopisto, Tampere. Saatavissa (viitattu 9.11.2019): POP > Opiskelu > Diplomityö > Diplomityöohje.
- [23] Tiehallinto, Tierakenteen suunnittelu, 2014.
- [24] Tutkintaselostus, Viiden tavaravaunun suistuminen kiskoilta Tuupovaaran ja Heinävaaran välillä 13.7.2006, Onnettomuustutkintakeskus.